

UNIVERSIDADE DE LISBOA
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



Análise multi-perigo de fenómenos naturais na bacia hidrográfica do rio Mundaú
(Brasil)

Walber Mendes Gama

Orientador: Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques do Reis

Tese especialmente elaborada para obtenção do grau de Doutor em Geografia, especialidade de
Geografia Física

2021

UNIVERSIDADE DE LISBOA
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



Análise multi-perigo de fenómenos naturais na bacia hidrográfica do rio Mundaú
(Brasil)

Walber Mendes Gama

Orientador(es): Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques do Reis

Tese especialmente elaborada para obtenção do grau de Doutor em Geografia,
especialidade de Geografia Física

Júri:

Presidente: Doutor José Luís Gonçalves Moreira da Silva Zêzere, Professor Catedrático e
membro do Conselho Científico do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da
Universidade de Lisboa

Vogais:

- Doutora Maria Elisa Zanella, Professora Associada
Departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará Brasil;
- Doutor Alexandre Manuel de Oliveira Soares Tavares, Professor Associado com
Agregação
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra;
- Doutor Carlos Valdir de Meneses Bateira, Professor Associado
Faculdade de Letras da Universidade do Porto;
- Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis, Professor Auxiliar
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa,
orientador;
- Doutora Susana da Silva Pereira, Professora Auxiliar
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa;

Esta tese foi financiada pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Brasil - CNPq
2021

Esta dissertação se integra no projeto de tese aprovado e desenvolvido no Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT) da Universidade de Lisboa (UL), financiado pelo programa Ciências Sem fronteiras sob a gestão do Conselho Nacional de Pesquisa do Brasil – CNPq.

A todos aqueles que sentiram minha ausência quando estive fora do Brasil, Alagoas, Maceió, e sentiram-se felizes pelo meu acesso ao doutoramento e deram o real apoio, reconhecimento e incentivo para vencer esta etapa noutro hemisfério na costa oeste do oceano Atlântico.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a oportunidade dada pelo amigo e professor doutor Eusébio Reis em aceitar ser meu orientador desde o início e no percurso do doutoramento em Geografia e, conseqüentemente, as orientações e ensinamentos e experiências disseminadas, através de seu conhecimento avançado no desenvolvimento de novas metodologias de pesquisa e capacitação no ensino superior. Agradeço ainda pela paciência e acompanhamento nas orientações durante todas as atividades de desenvolvimento desta tese de doutoramento na especialidade de Geografia física.

Agradeço também ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT), instituição de excelência que me acolheu, sendo espaço de aprendizado e formação avançada em Geografia, na especialidade de Geografia Física, e que confere o grau de doutor. Meus agradecimentos ao Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa e o grupo de pesquisa RiskKam, em especial, ao doutor José Luís Zêzere, pelo exemplo de liderança e produção do saber, sobretudo no campo de estudo da Geografia Física.

Aos colegas no Brasil, agradeço aos técnicos da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Alagoas – SEMARH, nas pessoas Vinícius Pinho (Meteorologista), pelo apoio dado nas etapas de campo e fornecimentos de dados para o desenvolvimento da tese de doutoramento e, em especial, à doutora Fabiana Carnaúba pelo incentivo desde o início de entrada no doutoramento pelo programa Ciências Sem Fronteiras.

Agradeço o apoio dado pelos os professores doutores Vicente Ferreira e Silvana Quintela do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente (IGDEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e ao Geógrafo e amigo Antônio Almeida pelo apoio técnico fornecido sempre que solicitado ao longo da tese e, no noutro

campo de estudo, em tecnologia da informação o apoio fornecido pelo técnico Danilo Farias.

E evidentemente vale lembrar ao apoio fornecido pelos familiares que sempre torceram pelo alcance dessa fase final em Portugal, em especial, as pessoas: Maria José Mendes Gama, Rosa Denise de Mesquita Mendes, Maurício Gama e Halysson Mendes Gama.

No que se refere ao apoio financeiro, os meus agradecimentos ao programa de fomento à bolsa de pesquisa no exterior a pesquisadores brasileiros, o que merece agradecimento a todo o apoio financeiro recebido pelo programa Ciências Sem Fronteiras (CsF) do Governo Federal do Brasil gerenciado pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Brasil (CNPq). Sem esse apoio seria inviável o desenvolvimento deste trabalho de doutorado no Centro de Estudos Geográficos (CEG) do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT) da Universidade de Lisboa (UL).

E a todos aqueles que de maneira direta ou indireta contribuíram no desenvolvimento deste trabalho e me deram incentivo na importância da formação acadêmica e avançada e na obtenção do grau de doutor para minha carreira profissional, científico e desenvolvimento pessoal.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	IV
ÍNDICE GERAL.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE QUADROS.....	XX
RESUMO	XXVI
BSTRACT	XXVIII
LISTA DE SIGLAS	XXX
INTRODUÇÃO.....	1
1 CONHECIMENTO RELATIVO À AVALIAÇÃO MULTI-PERIGO.....	7
1.1 Contexto e desenvolvimento do tema.....	7
1.2 Conceitos associados à avaliação multi-perigo	10
1.3 Estudos de avaliação multi-perigo	14
1.3.1 Abordagens metodológicas à avaliação multi-perigo	15
1.3.2 Ferramentas e plataformas Web na avaliação multi-perigo.....	29
1.3.3 Os estudos de multi-perigo em contexto de efeito de cascata	32
1.4 Síntese da avaliação multi-perigo.....	34
2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ.....	49
2.2 Estrutura geológica e litologia	52
2.3 Geomorfologia	57
2.4 Solos.....	66
2.5 Síntese das condições físicas da bacia hidrográfica	73
2.6 Caracterização climática: a distribuição da precipitação	75
2.6.1 Enquadramento climático.....	75
2.6.2 Características dos dados pluviométricos	85
2.6.2.1 Distribuição espacial das estações pluviométricas	85
2.6.2.2 Relação entre as séries de dados das estações pluviométricas	89
2.6.2.3 Enquadramento da série de precipitação anual 1963 – 1989	109
2.6.3 Qualidade e tratamento das séries anuais de precipitação.....	111

2.6.3.1	Análise de consistência das séries de precipitação anual.....	111
2.6.3.2	Identificação e colmatção de falhas de dados pluviométricos	113
2.6.4	Distribuição temporal da precipitação.....	116
2.6.4.1	Análise da precipitação anual.....	116
2.6.4.2	Análise da precipitação mensal	119
2.6.5	Síntese das condições climáticas.....	124
2.7	Caracterização demográfica e socioeconômica	127
2.7.1	População residente.....	127
2.7.1.1	Indicadores sociais da população dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	132
2.7.2	Socioeconomia.....	134
2.7.2.1	Produto interno Bruto (PIB) na bacia hidrográfica do rio Mundaú	134
2.8	Caracterização da ocupação do Solo.....	138
2.8.1	Metodologia de elaboração da cartografia de ocupação do solo	140
2.8.2	Resultados da classificação da ocupação do solo nos anos 2010 e 2011	145
2.8.3	Síntese.....	155
3.	PERIGOS NATURAIS E TECNOLÓGICOS	159
3.1	Erosão hídrica dos solos	159
3.1.1	Fator de Erosividade (R)	160
3.1.2	Fator de Erodibilidade (K).....	163
3.1.3	Fatores de comprimento (L) e declividade das vertentes (S).....	166
3.1.4	Erosão real e erosão potencial na bacia hidrográfica	171
3.1.4.1	Discussão dos resultados.....	178
3.2	Caracterização da instabilidade a movimentos de vertente.....	180
3.2.1	Elaboração do inventário de movimentos de vertente	181
3.2.2	Fatores utilizados na construção do modelo estatístico de instabilidade de vertentes.....	189
3.2.3	O método estatístico Valor Informativo (VI)	193
3.2.3.1	Validação do modelo de suscetibilidade a movimentos de vertentes.....	194
3.2.4	Cálculo da suscetibilidade e validação dos resultados	196
3.2.4.1	Valor informativo para cada fator	196

3.2.4.2	Suscetibilidade a instabilidade de vertentes	200
3.2.4.3	Validação do modelo de suscetibilidade	202
3.2.5	Discussão dos resultados.....	203
3.3	Inundações fluviais.....	205
3.3.1	Caracterização dos caudais na bacia hidrográfica do rio Mundaú	206
3.3.1.1	Dados utilizados na caracterização e análise das vazões	206
3.3.1.2	Ensaio estatísticos entre as estações hidrométricas para dados mensais	209
3.3.2	Análise espacial e temporal das vazões na bacia hidrográfica	214
3.3.2.1	Dados fluviométricos médios mensais	214
3.3.3	Principais eventos de inundações fluviais ocorridos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	217
3.3.3.1	Conclusão	250
3.3.4	Análise do tempo de resposta da elevação do nível d'água às precipitações ao longo do rio Mundaú	251
3.3.5.1	Resultados da modelagem morfométrica da bacia hidrográfica	260
3.3.5.2	Discussão dos resultados	267
3.3.6	Avaliação da suscetibilidade as inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	268
3.3.6.1	Elaboração do modelo de susceptibilidade a inundações fluviais	269
3.3.6.2	Elaboração dos fatores do modelo de suscetibilidade às inundações fluviais	271
3.4.6.3	Suscetibilidade a inundações fluviais.....	280
3.4.6.4	Interação espacial do modelo conceitual com os registros de cheias	283
3.4.6.5	Discussão e conclusão dos resultados	284
3.4.7	Rompimento de barragens de terra na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	289
3.4.7.1	Principais perigos tecnológicos decorrentes da presença de barragens de terras no setor de montante na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	289
3.4.7.2	Acidentes industriais associados a inundações fluviais	296
3.4.7.3	Considerações finais	304
4.	ANÁLISE MULTI-PERIGO DE FENÓMENOS NATURAIS E TECNOLÓGICOS	307
4.1	Danos potenciais na avaliação dos perigos	308

4.2 Metodologia de análise multi-perigo	311
4.2.1 Integração dos fenômenos potencialmente perigosos	311
4.2.2 Variáveis espaciais utilizadas no modelo multi-perigo	313
4.2.2.1 Suscetibilidade a erosão hídrica dos solos	314
4.2.2.2 Suscetibilidade a deslizamentos de terras	315
4.2.2.3 Suscetibilidade às inundações fluviais	315
4.2.3 Integração das variáveis espaciais no modelo multi-perigo	316
4.3 Resultados	318
4.3.1 Metodologia de integração das variáveis para elaboração do Modelo multi-perigo.....	318
4.4 Conclusão da análise multi-perigo	330
5. CONCLUSÃO GERAL	333
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	338
ANEXOS.....	357

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Mundaú na América do Sul e na região nordeste do Brasil, nos estados de Pernambuco e Alagoas.	50
Figura 2.2 – Hidrografia e altitude da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	51
Figura 2.3 – Unidades geológicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú (para significado das siglas, ver Quadro 2.2 e descrição no texto).	54
Figura 2.4 – Representação das estruturas de falhas na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	56
Figura 2.5 – Altitude (m) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	57
Figura 2.6 – Declividade (%) do relevo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	59
Figura 2.7 – Distribuição relativa (%) das classes de relevo.	60
Figura 2.8 – Distribuição das Unidades Geomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú, com base em CPRM – Serviço geológico do Brasil (Torres, 2014; Villanueva, 2016).	65
Figura 2.9 – Distribuição dos tipos de solos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	72
Figura 2.10 – Localização das estações climáticas na bacia hidrográfica e no entorno. ..	77
Figura 2.11 – Temperatura e precipitação mensais das normais climatológicas (1961 – 1990 e 1981 - 2010) da estação INMET Garanhuns.....	79
Figura 2.12 – Temperatura e precipitação mensais das normais climatológicas (1961 – 1990 e 1981 - 2010) da estação INMET Maceió.....	80
Figura 2.13 – Intensidade dos ventos mensais das normais climatológicas da estação INMET Garanhuns (1961-1990 e 1981- 2010).....	81
Figura 2.14 – Intensidade dos ventos mensais das normais climatológicas da estação INMET Maceió (1961 – 1990 e 1981-2010).	82
Figura 2.15 – Localização das estações pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	86
Figura 2.16 – Média do coeficiente de determinação mensal das 12 estações.	92
Figura 2.17 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Caetés com as 11 restantes estações.....	92
Figura 2.18 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Jucati com as 11 restantes estações.....	94
Figura 2.19 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Lagedo com as 11 restantes estações.....	95

Figura 2.20 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Garanhuns com as 11 restantes estações.	96
Figura 2.21 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Brejão com as 11 restantes estações.	98
Figura 2.22 – Coeficiente de determinação mensal médio da estação Correntes com as 11 restantes estações.	99
Figura 2.23 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Usina Serra Grande (USG) com as 11 restantes estações.	101
Figura 2.24 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação União dos Palmares com as 11 restantes estações.	102
Figura 2.25 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Murici com as 11 restantes estações.	103
Figura 2.26 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Atalaia com as 11 restantes estações.	105
Figura 2.27 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Rio Largo com as 11 restantes estações.	106
Figura 2.28 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Maceió com as 11 restantes estações.	108
Figura 2.29 – Localização das estações pluviométricas utilizadas no cálculo dos coeficientes de correlação e de determinação entre as séries mensais.	114
Figura 2.30 – Precipitação mensal média (mm) das estações pluviométricas.	120
Figura 2.31 – Localização das estações pluviométricas com período em comum na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	123
Figura 2.32 – Localização dos limites dos Estados de Pernambuco e Alagoas, dos municípios e respectivas sedes municipais.	128
Figura 2.33 – Densidade demográfica (hab/km ²) dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú no ano de 2010.	130
Figura 2.34 – Distribuição da incidência da pobreza (%) da população nos municípios situados na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	133
Figura 2.35 – Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da população dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú, nos anos de 1991, 2000 e 2010.	133
Figura 2.36 – Produto Interno Bruto (PIB) em 2015 nos setores de produção - agropecuário, indústria e de serviços -nos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	137
Figura 2.37 – Produto Interno Bruto – PIB dos setores: da agropecuária, da indústria e dos serviços correspondente ao ano de 2010 dos municípios situados na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	138

Figura 2.38 – Recortes das imagens Landsat TM 5, composições das bandas TM3, TM4 e TM5 capturadas em 29/09/2010 e órbita e ponto (215/066) correspondentes ao setor superior; e mosaico (união) das imagens capturadas em 18/03/2011 e órbita e ponto (21466/67) referente ao setor intermédio e jusante da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	142
Figura 2.39 – Ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú (período 29/09/2010 e 18/03/2011).....	147
Figura 2.40 – Frequência relativa (%) das classes de ocupação do solo (setembro 2010; março 2011) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	148
Figura 2.41 – Ocupação do solo em 11/06/1990 (a) e em 29/09/2010 (b), para o setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, a partir das imagens Landsat TM 5.	150
Figura 2.42 – Frequência relativa (%) das classes de ocupação do solo em junho de 1990 e setembro de 2010, no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	151
Figura 2.43 – Ocupação do solo em 14/03/1990 (a) e de 18/03/2011 (b), para o setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, a partir das imagens Landsat TM 5.....	152
Figura 2.44 – Frequência relativa (%) das classes de ocupação do solo em junho de 1990 e setembro de 2011, no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	153
Figura 3.1 – Dispersão, tendência e coeficiente de determinação (R^2) entre a erosividade e altitude na bacia hidrográfica.	161
Figura 3.2 – Distribuição espacial da erosividade da precipitação ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	162
Figura 3.3 – Distribuição espacial da erodibilidade ($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	164
Figura 3.4 – Distribuição espacial do Fator LS (comprimento e declive das vertentes) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	167
Figura 3.5 – Distribuição espacial do fator C associado aos tipos de ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	169
Figura 3.6 – Erosão potencial na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	172
Figura 3.7 – Erosão real na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	174
Figura 3.8 – Erosão hídrica do solo no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, nos anos 1990 e 2010.	175
Figura 3.9 – Frequência relativa (%) das classes de erosão hídrica nos anos 1990 e 2010, no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	176
Figura 3.10 – Erosão hídrica no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, nos anos de 1990 e 2011.....	177

Figura 3.11 – Comparação de frequências das classes de erosão hídrica nos anos 1990 (colunas A) e 2010 (colunas B).....	178
Figura 3.12 - Identificação em campo de deslizamentos situados no município de Santana do Mundaú.....	183
Figura 3.13 – Deslizamentos situados na vertente no município de Santana do Mundaú.	184
Figura 3.14 – Identificação das roturas de deslizamentos em campo situados no município de Santana do Mundaú.....	184
Figura 3.15 – Marcas de roturas dos deslizamentos identificados em campo na vertente situada no município de Santana do Mundaú.	185
Figura 3.16 – Marcas de roturas dos deslizamentos identificados em campo na vertente situada no município de São José da Lage.....	185
Figura 3.17 – Identificação da rotura de deslizamento identificados em campo na vertente situada no município de São José da Lage.....	186
Figura 3.18 – Ilustração dos resultados do processo de transformação das amostras de deslizamentos em polígonos (vetorial) para Raster (matricial).	187
Figura 3.19 – Localização dos deslizamentos de terras que compõem o inventário na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	189
Figura 3.20 – Fluxograma da aplicação do modelo de suscetibilidade valor informativo na área de estudo.....	196
Figura 3.21 – Suscetibilidade a deslizamentos de terras na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	201
Figura 3.22 – Resultado da validação do modelo de suscetibilidade a deslizamentos...	203
Figura 3.23 – Localização das estações fluviométricas e rede hidrográfica na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	208
Figura 3.24 – Relação entre as estações fluviométricas de Santana do Mundaú e de São José da Lage, nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).	210
Figura 3.25 – Relação entre as estações fluviométricas de União dos Palmares e de Santana do Mundaú nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).....	211
Figura 3.26 – Relação entre as estações fluviométricas de São José da Lage e União do Palmares nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).....	212
Figura 3.27 – Relação entre as estações fluviométricas de Murici - Ponte e União do Palmares nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).....	213
Figura 3.28 – Relação entre as estações fluviométricas de Murici e de Fazenda Boa Fortuna nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).....	214

Figura 3.29 – Vazão média mensal nas estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Mundaú (1993 – 2015).....	215
Figura 3.30 – Precipitação (mm) em 4/03/1941 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	220
Figura 3.31 – Precipitação (mm) em 5/03/1941 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	220
Figura 3.32 – Precipitação (mm) em 16/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	222
Figura 3.33 – Precipitação (mm) em 17/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	222
Figura 3.34 – Precipitação (mm) em 17/05/1949 a 18/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	223
Figura 3.35 – Precipitação (mm) em 17/05/1949 a 18/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	223
Figura 3.36 – Precipitação (mm) em 18 a 19 /05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	224
Figura 3.37 – Precipitação (mm) em 19 /05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	224
Figura 3.38 – Monumento de registro da inundação fluvial in situ, localizado num ponto atingido pela cheia de 1969 no município de São José da Lage.	226
Figura 3.39 – Precipitação (mm) em 13/03/1969 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	227
Figura 3.40 – Precipitação (mm) em 14/03/1969 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	228
Figura 3.41 – Precipitação (mm) em 15/06/1975 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	229

Figura 3.42 – Precipitação (mm) em 16/06/1975 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	229
Figura 3.43 – Precipitação (mm) em 17/06/1975 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	230
Figura 3.44 – Precipitação (mm) em 15/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	231
Figura 3.45 – Precipitação (mm) em 16/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	232
Figura 3.46 – Precipitação (mm) em 17/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	232
Figura 3.47 – Precipitação (mm) em 18/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	233
Figura 3.48 – Precipitação (mm) em 11/06/1989 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	234
Figura 3.49 – Precipitação (mm) em 12/06/1989 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	235
Figura 3.50 – Precipitação (mm) em 13/06/1989 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	235
Figura 3.51 – Precipitação (mm) em 30/07/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	237
Figura 3.52 – Precipitação (mm) em 31/07/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	238
Figura 3.53 – Precipitação (mm) em 01/08/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	238

Figura 3.54 – Precipitação (mm) em 02/08/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	239
Figura 3.55 – Precipitação (mm) em 17/07/2010 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	242
Figura 3.56 – Precipitação (mm) em 18/07/2010 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	242
Figura 3.57 – Precipitação (mm) em 19/07/2010 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha ponteadada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.	243
Figura 3.58 – Estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas na caracterização e comparação da precipitação com as vazões causadoras das inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	245
Figura 3.59 – Precipitações diárias nas estações pluviométricas e vazões diárias na estação fluviométrica de Murici, no período 11 de junho a 31 de julho de 1988.	246
Figura 3.60 – Precipitação das estações pluviométrica de Caetés, Correntes, São José da Lage (SJL), Ibateguara, União dos Palmares e Murici comparado com os valores de vazão da estação fluviométrica de Fazenda Boa Fortuna (FBF).	248
Figura 3.61 – Precipitação diária do mês de setembro de 2000 da estação de Canhotinho e valores diários de vazão da estação de São José da Lage em 22 de julho a 13 de agosto de 2000.	249
Figura 3.62 – Localização das estações pluviométricas automáticas com medições e de nível do rio utilizadas na elaboração do tempo de resposta do rio Mundaú.	253
Figura 3.63 – Precipitação (mm) na estação de São José da Lage e nível do rio (cm) em União dos Palmares, no dia do evento de cheia em 04/05/2011.	254
Figura 3.64 – Dados de precipitação da estação pluviométrica de Canhotinho/São José da Lage comparados com os dados de nível do rio da estação da Usina Laginha em União dos Palmares.	255
Figura 3.65 – Dados de precipitação da estação pluviométrica de Canhotinho/São José da Lage/Usina Laginha em União dos Palmares comparado com nível d'água da estação Fazenda Boa Fortuna (FBF).	256
Figura 3.66 – Hierarquia de rede de drenagem, segundo o método de Strahler, na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	263
Figura 3.67 – Comprimento total (km) dos canais fluviais para cada valor de hierarquia (1,2,3,4,5 e 6) segundo a classificação de Strahler.	263

Figura 3.68 – Magnitude da rede drenagem, segundo o método de Shreve, na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	264
Figura 3.69 – Declividade média (%) dos canais de drenagem fluvial na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	266
Figura 3.70 – representação em porcentagens das classes de declividade média dos canais fluviais da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	267
Figura 3.71 – Fluxograma das etapas de aplicação e elaboração das variáveis do modelo conceitual de suscetibilidade a cheias (adaptado de Reis, 2011).	270
Figura 3.72 – Localização dos pontos de registros de inundações fluviais, de acordo com os dados da Defesa Civil Nacional do Brasil e de levantamento de campo	275
Figura 3.73 – Grupo hidrológico dos solos da área de estudo.	277
Figura 3.74 – Frequência relativa (%) dos grupos hidrológicos dos solos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	278
Figura 3.75 – Variável CN – Curve Number da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	279
Figura 3.76 – Frequência relativa (%) das classes de valores de CN na área de estudo.	280
Figura 3.77 – Suscetibilidade a cheias dos cursos d'água na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	282
Figura 3.78 – Classes de suscetibilidade associada aos registros de inundações fluviais utilizado na validação do modelo conceitual.	284
Figura 3.79 – Representação espacial da suscetibilidade a cheias do setor jusante da bacia hidrografia da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	286
Figura 3.80 – Representação espacial do setor central de bifurcação dos rios Mundauzinho, Inhumas e Canhotinho e a suscetibilidade na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	287
Figura 3.81 – Setor de planície fluvial a jusante da bacia hidrográfica, trecho fluvial do riacho Caboclo com delimitação da planície fluvial (linhas em branco) e fluxo do rio em direção (seta em azul) a região estuarina da laguna Mundaú região de sua foz	288
Figura 3.82 – Localização dos maiores reservatórios de água situados no setor montante da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	290
Figura 3.83 – Localização dos reservatórios barragem e as áreas urbanas e propriedades rurais.	291
Figura 3.84 – Vista do reservatório Cajarana construída com estrutura de terra indicada pelas setas em amarelo (imagem da plataforma GoogleEarth data: 19/10/2019).	292
Figura 3.85 – Reservatórios construídas com estruturas de terra indicada pelas setas em amarelo. Vistas pelas Imagens da plataforma GoogleEarth data: 19/10 2018 Mundaú..	293

Figura 3.86 – Reservatórios construídas com estruturas de terra indicada pelas setas em amarelo. Vistas pelas Imagens da plataforma GoogleEarth data:15/12/2018 Mundaú II – Cajueiro.	293
Figura 3.87 – Vista do reservatório Mundaú II – Cajueiro construído em estrutura de terra.	293
Figura 3.88 – Vista do reservatório Inhumas com estrutura de terra indicada pela seta em amarelo (imagem da plataforma GoogleEarth data: 25/09/2019).	294
Figura 3.89 – Vista frontal do reservatório/barragem Inhumas em estrutura de concreto e vertendo água.	294
Figura 3.90 – Reservatório/barragem Espeto construído com estrutura de terra indicado pela seta em amarelo (imagem da plataforma GoogleEarth data: 06/12/2016).	295
Figura 3.91 – Localização das indústrias situadas a jusante e a suscetibilidade dos cursos d'água ao longo da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	297
Figura 3.92 – Localização da usina Serra Grande situada no setor de suscetibilidade moderada a cheias e área urbana de São José da Laje a jusante com suscetibilidade elevada.	298
Figura 3.93 – Localização da indústria de produção de açúcar e Alcool Usina.	299
Figura 3.94 – Usina Laginha, município de União dos Palmares, Alagoas, situada a margem direita do rio Mundaú onde pode ser visualizado os seis tanques de armazenamento de álcool antes da ocorrência da cheia de junho de 2010. Fonte (http://www.alagoas24horas.com.br	300
Figura 3.95 – Registro da ação da cheia de junho de 2010 ao atingir a Usina Larginha onde é possível observar a ausência de tanques de armazenamento e a permanência apenas de um dos seis tanques de armazenamento de Alcool.	300
Figura 3.96 – Enquadramento da Usina Santa Clotilde situada na margem esquerda do rio Mundaú, num setor do rio com suscetibilidade extremamente alta e, a jusante, a área urbana do município de Rio Largo.	301
Figura 3.97 – Usina Santa Clotilde situada a margem direita do rio Mundaú, num meandro, no município de Rio Largo, Alagoas, no momento em que foi atingida pela cheia de 20/06/2010, na figura está a orientação do norte.	302
Figura 3.98 – Imagem em detalhe da localização da indústria Leão de produção de açúcar e álcool e Timac de produção de fertilizantes agrícolas ambas situadas na margem direita do rio Mundaú setores de suscetibilidade extremamente elevada.	303
Figura 3.99 – Fábrica de tecidos da Timac Agro Indústria e comércio Fertilizantes situado as margens do rio Mundaú.	303
Figura 4.1 – Consequências negativas das cheias (adaptado de Smith & Ward, 1998).	309

Figura 4.2 – Fluxograma representativo do modelo de análise multi-perigo de fenómenos naturais e tecnológicos.	312
Figura 4.3 – Mapas utilizados na elaboração do Modelo Multi-Perigo, classificados em quartis: erosão hídrica do solo (A); deslizamentos (B); inundações fluviais (C).....	316
Figura 4.4 – Amplitude dos intervalos de classes (h_i) com aumento da ponderação do fator inundações fluviais, e linha de tendência de resultados dos testes de integração/interação do modelo multi-perigo.	319
Figura 4.5 – Cartografia multi-perigo de fenómenos naturais e tecnológicos na bacia hidrográfica do rio Mundaú. (reescrever)	323
Figura 4.6 – Localização dos reservatórios barragens e os níveis multi-perigo no setor de montante da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	325
Figura 4.7 – Multi-perigo e as infraestruturas situadas no setor intermédio da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	327
Figura 4.8 – Multi-perigo no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	329

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Síntese das abordagens multi-perigo a partir de ferramentas e plataformas web que abordam os múltiplos perigos.	36
Quadro 1.2 – Caracterização dos trabalhos de abordagem multi-perigo e dos riscos.	41
Quadro 1.3 – Caracterização dos trabalhos de abordagem multi-perigo que abordam o efeito em cascata.	44
Quadro 2.1 – Comprimento dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	51
Quadro 2.2 – Frequência das classes de geologia na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	55
Quadro 2.3 – Indicadores do relevo da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	58
Quadro 2.4 – Relação da classificação do relevo da bacia hidrográfica, de acordo com Assad (1994), com a declividade na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	60
Quadro 2.5 – Frequência das unidades geomofológicas na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	66
Quadro 2.6 – Frequência das classes de solos na bacia hidrográfica.	73
Quadro 2.7 – Características das estações climáticas na bacia hidrográfica e no entono.	77
Quadro 2.8 – Características das estações pluviométricas na bacia hidrográfica e área envolvente.	87
Quadro 2.9 – Parâmetros das estações pluviométricas utilizadas na caracterização da precipitação.	88
Quadro 2.10 – Coeficiente de determinação (R^2) entre as estações pluviométricas, obtido a partir das séries de precipitação anual para o período 1963 a 1989 (27 anos).	89
Quadro 2.11 – Maiores valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos entre os dados anuais entre as estações pluviométricas.	90
Quadro 2.12 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Caetés.	93
Quadro 2.13 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Jucati.	94
Quadro 2.14 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Lagedo.	96
Quadro 2.15 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Garanhuns.	97
Quadro 2.16 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Brejão.	98
Quadro 2.17 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Correntes.	100
Quadro 2.18 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Usina Serra Grande (USG).	101

Quadro 2.19 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação União dos Palmares.....	103
Quadro 2.20 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Murici.	104
Quadro 2.21 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Atalaia.	105
Quadro 2.22 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Rio Largo da série 1963 – 1989.....	107
Quadro 2.23 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Maceió.....	108
Quadro 2.24 – Comparação de parâmetros estatísticos na estação Usina Serra Grande entre as séries 1922-1962 e 1963-1989.....	109
Quadro 2.25 – Comparação de parâmetros estatísticos na estação de Atalaia entre as séries 1913 – 1990 e 1963 – 1989.....	111
Quadro 2.26 – Características das estações utilizadas nas correlações mensais utilizadas como referências para colmatagem das falhas mensais.	113
Quadro 2.27 – Identificação de falhas das estações pluviométricas, no período 1963 a 1989.	115
Quadro 2.28 – Medidas estatísticas da precipitação anual (mm) (1963 a 1989).	118
Quadro 2.29 – Medidas estatísticas da precipitação anual (mm) das estações Brejão (1967 – 1989) e Rio Larago (1963 - 1981).	118
Quadro 2.30 – População residente em municípios totalmente compreendidos na bacia hidrográfica do rio Mundaú, de 2000 a 2018.	129
Quadro 2.31 – População residente nas áreas urbanas e rurais dos municípios	131
Quadro 2.32 – Resumo das estatísticas de IDH para os residentes nos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	134
Quadro 2.33 – Produto Interno bruto (PIB) dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	136
Quadro 2.34 – Caracterização das imagens das imagens de satélite LandsatTM5, utilizadas no processo de classificação supervisionada.....	140
Quadro 2.35 – Escala de avaliação dos valores do índice Kappa.	144
Quadro 2.36 – Índice Kappa e Valor Global (<i>overall</i>) derivado da matriz de confusão, para a verificação da acurácia das classificações das imagens Landsat TM 5.	145
Quadro 2.37– Frequência das classes de ocupação do solo (setembro 2010; março 2011) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	148
Quadro 2.38 – Frequência das classes de ocupação do solo em 1990 e em 2010 no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	150
Quadro 2.39 – Classes de uso e ocupação do solo entre o período de março de 1990 e 2011 em termos percentuais do setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	153

Quadro 3.2 – Valores de erosividade nas 10 estações pluviométricas, utilizados no cálculo da erosividade da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	161
Quadro 3. 3– Classificação do fator de erodibilidade.	163
Quadro 3.4 – Fator de erodibilidade (K) dos solos da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	165
Quadro 3.5 – Frequência dos valores do fator de erodibilidade (K) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	165
Quadro 3.6 – Frequência das classes de valores do fator LS na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	166
Quadro 3.7 – Classes de ocupação do solo, respectivas áreas e valores atribuídos ao fator C.	168
Quadro 3.8 – Classes utilizadas nos mapas de erosão potencial e erosão real.	171
Quadro 3.9 – Frequência das classes de erosão potencial e real dos solos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	173
Quadro 3.10 – Erosão hídrica real do solo em 1990 e 2010 no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	176
Quadro 3.11 – Erosão hídrica real em 1990 e 2011 no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	178
Quadro 3.12 – Base de dados utilizada na elaboração do inventário de movimentos de vertente (deslizamentos).	183
Quadro 3.13 – Parâmetros da área (m ²) dos deslizamentos em polígonos e em estrutura matricial com resoluções de 15 e 30 m.	187
Quadro 3.14 – Representação das áreas deslizadas em estrutura vetorial e matricial de 4 deslizamentos.	188
Quadro 3.15 – Contabilização e caracterização estatística dos deslizamentos. .	188
Quadro 3.16 – Fator Declive (°), utilizado na modelagem da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	190
Quadro 3.17 – Fator Ocupação do Solo, utilizado na modelagem da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	190
Quadro 3.18 – Fator Solos, utilizado na modelagem da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	191
Quadro 3.19 – Fator Geomorfologia, utilizado na modelagem de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	192
Quadro 3.20 – Fator Litologia, utilizada na modelagem de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	193

Quadro 3.21 – Qualidade dos modelos de suscetibilidade, de acordo com Guzzetti <i>et al.</i> (2006).	195
Quadro 3.22 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Declividade.....	197
Quadro 3.23 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Uso do Solo.....	198
Quadro 3.24 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Solos.	198
Quadro 3.25 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Geomorfologia.....	199
Quadro 3.26 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Litologia.	200
Quadro 3.27 – Classificação do modelo de suscetibilidade e frequência das classes de suscetibilidade na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	203
Quadro 3.28 – Período de dados das estações fluviométricas.	207
Quadro 3.29 – Caracterização geográfica das estações fluviométricas.	207
Quadro 3.30 – Quantidades de dados médios mensais das 5 estações fluviométricas utilizadas na caracterização das vazões (1993 - 2015).....	209
Quadro 3.31 – Vazões médias mensais (m^3/s) e diferença relativas das estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Mundaú (1993 a 2015).	216
Quadro 3.32 – Registros de ocorrências de inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	218
Quadro 3.33 – Caracterização dos dados de precipitação South America Precipitation Reanalysis da National Oceanic Atmospheric Administration.	219
Quadro 3.34 – Número de pessoas afetadas pela inundação fluvial nos municípios do estado de Alagoas e tipo de perigo ocorrido.	236
Quadro 3.35 – Perdas e pessoas afetadas pelas as fortes precipitações ocorridas nos dias 18 e 19 de Junho de 2010 na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	240
Quadro 3.36 – Danos nas Infraestrutura atingidas pelas inundações fluviais nos municípios situados na bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	241
Quadro 3.37 – Inundações fluviais de acordo com a ocorrência espacial e influência da precipitação nos setores da bacia hidrográfica do rio Mundaú.....	250
Quadro 3.38 – Método de cálculo do tempo de concentração (T_c) na área de estudo.	260
Quadro 3.39 – Resultados dos indicadores geométricos da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	261

Quadro 3.40 – Resultados dos indicadores geométricos da bacia hidrográfica do rio Mundaú.	261
Quadro 3.41 – Tempo de concentração da bacia hidrográfica do rio Mundaú. ...	267
Quadro 3.42 – Variáveis médias do modelo conceitual e equações de regressão linear.	273
Quadro 3.43 – Registros de inundações fluviais utilizados na validação do modelo conceitual de suscetibilidade a inundações fluviais.....	276
Quadro 3.44 – Níveis de suscetibilidade e registros de inundações fluviais.	283
Quadro 3. 45 – Características dos principais reservatórios situados a montante na bacia hidrográfica do rio Mundaú.	290
Quadro 4.1 – Resultados dos testes de integração das variáveis, para diversas ponderações dos fatores, do modelo de avaliação multi-perigo por Análise Multi-Critério (AMC).	318
Quadro 4.2 – Caracterização da representação espacial do modelo multi-perigo.	321

RESUMO

Objetivo e foco desta tese consiste no desenvolvimento de uma metodologia de análise dos múltiplos perigos naturais de forma integrada (multi-perigo) numa relação causa e efeito, na perspectiva do efeito em cascata.

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio Mundaú, situada na região nordeste do Brasil, nos estados de Pernambuco e Alagoas, de aproximadamente 4103 km². Esta área de estudo foi escolhida por apresentar recorrência de inundações fluviais, forte transporte de sedimentos e ocorrência de deslizamentos de terras. Existem também perigos tecnológicos, associados a eventuais rompimentos de reservatórios/barragens, constituídos por estruturas de terras, e indústrias expostas aos multi-perigos ao longo do rio Mundaú, que sofreram danos decorrentes de inundações fluviais.

Assim, utilizaram-se diferentes métodos para avaliar a suscetibilidade da bacia hidrográfica do rio Mundaú a cada um dos perigos naturais: erosão hídrica dos solos, deslizamentos de terras e inundações fluviais. Apesar de não ser objetivo central desta tese, é feita a caracterização dos perigos tecnológicos de rompimento de reservatórios/barragens e da exposição das indústrias, no contexto dos perigos naturais, em particular associada a inundações fluviais.

A avaliação da suscetibilidade à erosão hídrica dos solos foi alcançada através da aplicação da Equação Universal de Perdas dos Solos (EUPS); a suscetibilidade a movimentos de massa em vertentes foi realizada por modelo estatístico bivariado e a inundação fluvial por um modelo conceptual que considera as variáveis médias acumuladas representativas do escoamento superficial concentrado. Para a representação dinâmica do processo de transporte de sedimentos calculou-se o SDR (*Sediment Delivery Ratio*).

A integração dos múltiplos perigos naturais foi realizada através de ponderação por análise multi-critério, onde o maior peso foi fornecido ao fenómeno de maior

intensidade e ocorrência na bacia hidrográfica, as inundações fluviais, seguido pelos deslizamentos e transporte sedimentar. Com a integração dos perigos múltiplos foram definidos 5 níveis de suscetibilidade multi-perigo na bacia hidrográfica.

As condições naturais do terreno da bacia hidrográfica apresentam predisposição à ocorrência do multi-perigo e as condições ambientais intensificam os processos hidrogeomorfológicos de transporte de carga sólida desde as vertentes aos fundos de vales e setores de menores declives, que propiciam a acumulação de carga sólida sedimentar ao longo dos cursos de água, e intensificam os níveis de multi-perigo de forma acumulativa desde montante a jusante na bacia hidrográfica. Assim, constatou-se que os níveis multi-perigo são mais elevados desde o setor intermédio ao inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú. Mais também, os níveis de multi-perigo nos setores supracitados serão intensificados por eventuais rompimentos de barragens de terra a montante.

Esta avaliação multi-perigo na perspectiva do efeito em cascata permite analisar espacialmente de forma dinâmica como os perigos naturais e tecnológicos interagem no território, à escala regional, numa relação causa e efeito, como também regionalizar os níveis do multi-perigo em diferentes setores da bacia hidrográfica associados ao fator desencadeante, a precipitação.

Pelo que se observa, as indústrias instaladas em planície fluvial estão expostas aos elevados níveis de multi-perigo e as populações ribeirinhas estão vulneráveis ao multi-perigo em leito de inundação fluvial sob ação direta de carga sólida concentrada. Portanto, pode-se concluir que são necessárias medidas de gerenciamento, prevenção e mitigação dos riscos e o ordenamento do território para evitar perdas de vidas e danos materiais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

BSTRACT

The goal of this thesis is the development of a methodology for analyzing the multiple natural hazards in an integrated perspective (multi-hazard) in a cause-effect relationship and cascade effect context.

The study area, with approximately 4103 km², corresponds to the Mundaú river watershed, located in the northeastern region of Brazil, in the states of Pernambuco and Alagoas. This study area was chosen as it presents river flooding recurrence, strong sediment transport and occurrences of landslides, associated with terrain geomorphological and environmental conditions of the basin; the technological hazards are related to eventual break of reservoirs/dams because they are earth structures and to the exposure of these infrastructures to the multi-hazard; also observed are industries exposed to hazard along the Mundaú river.

Thus, different methods were used to evaluate the susceptibility of the Mundaú river basin to each of the natural hazards: soil water erosion, landslides and river floods. The characterization of the technological hazards of reservoirs/dams disruption is made descriptively by exposure to multi-hazard and the exposure of the industries associated with river floods.

The evaluation of soil erosion by water susceptibility was achieved through the application of the Universal Soil Loss Equation (USLE); the susceptibility to slope mass movement was performed with an bivariate statistical model and the river flood susceptibility was identified through a conceptual model that considers the accumulated mean variables representative of the concentrated surface runoff. The SDR (Sediment Delivery Ratio) was calculate for the dynamic representation of the sediment transport process.

In fact, the integration of the multiple natural hazards was performed using an weighting method by multi-criteria analysis where the greatest weight was provided to the phenomenon of greater intensity and occurrence in the watershed, the river

floods, followed by landslides and sedimentary transport. With the integration of the multiple hazard 5 levels of multi-hazard susceptibility were defined in the watershed.

The natural conditions of the watershed terrain are predisposing to the occurrence of multi-hazard and the environmental conditions of the watershed intensify the hydrogeomorphological processes of solid load transport from hillside to the bottom of valleys and sectors of smaller slopes that provide the sediment accumulation and transport along the rivers, which intensify the levels of multi-hazard accumulative from upstream to downstream in the watershed. Thus, it was identified that the multi-hazard levels are higher from the intermediate to the lower sector of the Mundaú river basin. More also, the levels of multi-hazard in the intermediate and lower sectors may be intensified by eventual earth dams break located upstream.

This multi-hazard evaluation in the perspective of the cascading effect allows to spatially analyze dynamically how the natural and technological hazard interact on the territory, in an regional scale, in a cause-effect relationship, as well as regionalize the levels of multi-hazard in different sectors of the watershed associated with precipitation as triggering factor.

From what is observed, the occupations in the river plain of the industries are exposed to the high levels of multi-hazard and the riverine populations are vulnerable to multi-hazard in river floodplain under direct action of concentrated solid load. Therefore, it can be concluded that measures of risk management, prevention and mitigation and the Territory planning are necessary to avoid life and material damage in the river Mundaú watershed.

LISTA DE SIGLAS

AGSO	<i>Australian Geological Survey Organisation</i>
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EMDAT	<i>International Disaster Database</i>
ESRL	<i>Earth System Research Laboratory</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
GNS	<i>Science New Zealand Crown Research Institute</i>
Hab	Habitantes
IPA	Instituto de Pesquisa Aplicada
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
PDRH	Plano Diretor de Recursos Hídricos
PSD	<i>Physical Sciences Division</i>
RNDMR	<i>Reducing natural disasters multiple risk</i>
Seplan	Secretaria de planejamento do estado de Alagoas
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
UNDRO	<i>United Nations Disaster Relief Organization</i>
UNISDR	<i>United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
WEBSIG	Sistema de informação Geográfica <i>online</i>
ZCEN	Zona de Convergência do Nordeste

INTRODUÇÃO

A população mundial continua a crescer e os perigos naturais e tecnológicos estão sendo mais comuns no mundo. Os perigos naturais têm sido frequentes e de grande perigosidade para os seres humanos e meio ambiente. De acordo com o banco de dados internacional de desastres (EM-DAT), do Centro de Pesquisa sobre Epidemiologia de Desastres (CRED), desde 1900 cerca de 130 000 pessoas perderam a vida por causa de deslizamentos de terra e inundações fluviais repentinas; e as perdas econômicas somaram mais de 50×10^9 dólares. No período de 2000 a 2014, os números correspondentes foram cerca de 26 000 mortes e 40×10^9 dólares em danos. No entanto, os números reais podem ser muito maiores (UNISDR, 2017).

Perigos naturais de deslizamentos de terra, erosão hídrica dos solos e inundações fluviais, assim como os impactos associados aos elementos tecnológicos, essencialmente a exposição dos reservatórios/barragens e das indústrias aos perigos naturais supracitados, são analisados nesta tese de maneira integrada considerando que um fenómeno perigoso interage com a ação de outros numa relação causa e efeito.

Dessa forma, essa tese busca preencher a lacuna de estudos que avaliem os perigos múltiplos naturais de forma integrada no território, analisados na perspectiva do efeito em cascata ou dominó.

No Brasil, tanto os conceitos de avaliação de riscos assim como a análise integrada dos perigos (multi-perigo) ainda são escassos, onde se observa a necessidade de assimilação pelos órgãos gestores de riscos e gestão de desastres naturais, onde os perigos naturais são tratados separadamente, havendo ainda a necessidade de incorporar a concepção e terminologias de avaliação de riscos e de análise integrada dos perigos múltiplos no território.

Para tanto, este trabalho é elaborado no contexto da avaliação dos perigos naturais e tecnológicos a nível regional baseado numa avaliação holística dos

processos de deslizamentos de terras, erosão hídrica dos solos e inundações fluviais e dos impactos nas infraestruturas locais (reservatórios/barragens e indústrias).

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do rio Mundaú, com superfície de 4103 km², e abrange total ou parcialmente um conjunto de 15 municípios: a metade superior (estado de Pernambuco) inclui os municípios de Caetés, Garanhuns, São João, Angelim, Canhotinho, Lagoa do Ouro, Correntes e Palmeirina; a metade inferior (estado de Alagoas) inclui os municípios de Santana do Mundaú, São José da Lage, União dos Palmares, Branquinha, Murici, Rio Largo e Santa Luzia do Norte. No primeiro setor há forte predisposição a processos de erosão hídrica dos solos e a presença de reservatórios/barragens de terra, que constituem perigos tecnológicos potenciais, podendo afetar as áreas urbanas de Correntes e de Canhotinho, mais expostas aos perigos de inundações fluviais.

No segundo setor, estão as indústrias de produção de açúcar e álcool expostas aos perigos de transporte de carga sólida associado as ações intensas das inundações fluviais.

Os trabalhos desenvolvidos anteriormente na bacia hidrográfica são relativos a inundações fluviais (Monte *et al.*, 2016) e carecem de estudos de suscetibilidade a deslizamentos de terras e de erosão hídrica dos solos, assim como da associação e exposição ao perigo de rompimentos de reservatórios/barragens e também à exposição das indústrias ao multi-perigo.

Deste modo, a presente tese pretende analisar, de forma integrada e sistemática, e numa perspectiva de efeito em cascata, os vários perigos naturais e tecnológicos (análise multi-perigo) que afetam a bacia hidrográfica do rio Mundaú: deslizamentos de terras, erosão hídrica dos solos, inundações fluviais, com uma breve referência aos rompimentos de barragens e aos elementos industriais; pretende-se, assim, identificar áreas sensíveis aos multi-perigo naturais, avaliando a forma como estes podem interagir entre si.

A partir do objetivo geral, definido antes, podem-se identificar os seguintes objetivos específicos:

- i) Identificar os perigos naturais e tecnológicos na bacia hidrográfica do rio Mundaú;
- ii) Avaliar a suscetibilidade da bacia hidrográfica a cada um dos perigos naturais considerados: inundações fluviais, deslizamentos de terra e erosão hídrica dos solos;
- iii) Avaliar a forma como os perigos naturais se relacionam no mesmo território, numa abordagem multi-perigo e considerando a propagação ao longo da bacia hidrográfica;
- iv) Identificar a exposição dos reservatórios/barragens e indústrias ao transporte de carga sólida e inundações fluviais.
- v) Avaliar a vulnerabilidade e exposição na bacia hidrográfica aos multi-perigo, que decorrem dos métodos de análise de suscetibilidade utilizados.

Para responder aos objetivos geral e específicos supracitados, este trabalho está estruturado em 4 capítulos. No capítulo 1 é realizada a revisão bibliográfica, o capítulo 2 é feita a caracterização da área de estudo; os perigos naturais no capítulo 3 e a integração dos perigos naturais (multi-perigo) no capítulo 4.

No capítulo 1, é apresentado a contextualização da temática do multi-perigo, pelos conceitos, terminologias e diferentes metodologias de avaliação de múltiplos perigos e, também, estudos que abordam a análise multi-perigo na perspectiva de efeito em cascata e, por fim, é feita a síntese dos métodos de avaliação multi-perigo.

No capítulo 2 é realizado o enquadramento geográfico da bacia hidrográfica na região nordeste do Brasil e sua caracterização física com base na geologia e litologia, geomorfologia, solos e descrita a relação das características físicas do terreno associadas aos perigos naturais em forma de síntese. Realizou-se também

a caracterização da ocupação do solo através de classificações supervisionadas de imagens de satélites *LandSat Thematic Mapper 5*, que permitiu descrever a evolução do uso do solo ao longo de 10 anos e as condições ambientais da bacia hidrográfica associadas aos perigos naturais no território. É feita ainda a caracterização climática a partir da distribuição espacial da precipitação mensal e anual na bacia hidrográfica e associação obtida pelo coeficiente de determinação (R^2) entre as estações pluviométricas. Em relação aos aspectos que caracterizam a população na bacia hidrográfica, descreve-se a população residente, aspectos sociais e socioeconomia, por município.

No capítulo 3 são descritos, de forma independente, os perigos naturais e tecnológicos na bacia hidrográfica, assentes na análise de suscetibilidade. A erosão hídrica dos solos, potencial e real, é obtida através da Equação Universal de Perda dos Solos (EUPS); para a erosão real, é feita a comparação nos anos 1990 e 2010 no setor superior e 1990 e 2011 no inferior da bacia hidrográfica. Realizou-se também a caracterização da instabilidade a movimentos de vertentes obtida pela suscetibilidade a deslizamentos de terras por meio de um método estatístico bivariado. É descrita a morfometria da bacia hidrográfica e o comportamento fluvial é caracterizado pelos caudais e pelos principais eventos de inundações fluviais, através da associação entre a precipitação e as respostas das vazões na elevação do nível do rio. É aplicado, também, um método de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de inundações associadas aos troços da rede de drenagem na bacia hidrográfica. No final do capítulo, são descritos os perigos tecnológicos de rompimentos de barragens/reservatórios e a exposição das indústrias ao perigo de inundação fluvial.

Por fim, no capítulo 4 é elaborada a metodologia de integração dos perigos naturais, por aplicação da análise multi-critério, em que se associam os três resultados da suscetibilidade: erosão hídrica dos solos, representativa do transporte sedimentar; movimentos de vertente; e inundações fluviais, representativas do escoamento superficial concentrado. Os perigos de

rompimentos dos reservatórios/barragens são descritos pela fragilidade das estruturas de terras dos barramentos, e a exposição dos mesmos reservatórios/barragens e indústrias ao multi-perigo numa relação causa e efeito. No que se refere aos perigos naturais de erosão hídrica dos solos, movimento de vertentes e inundações fluviais são analisados de forma integrada na perspectiva do efeito em cascata, assim como é feita a comparação do ponto de vista espacial do fator desencadeante, a precipitação, com os níveis de suscetibilidade multi-perigo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

A conclusão do trabalho relaciona os níveis de multi-perigo aos fatores condicionantes da bacia hidrográfica e à exposição das infraestruturas locais, à localização das populações ribeirinhas vulneráveis ao multi-perigo e às condições socioeconômicas dos residentes nos municípios associados à vulnerabilidade e capacidade de recuperação pós desastre. Por fim, são apresentadas propostas de gerenciamento e mitigação dos impactos ambientais na bacia hidrográfica para minimização das perdas de vidas e dos danos materiais decorrentes do efeito em cascata do multi-perigo no território.

1 CONHECIMENTO RELATIVO À AVALIAÇÃO MULTI-PERIGO

1.1 Contexto e desenvolvimento do tema

O tema da mitigação dos riscos tem sido introduzido na agenda política e um número crescente de governos e organizações internacionais passou a promover a mitigação dos riscos como solução sustentável para minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais das catástrofes naturais, tecnológicas e ambientais.

Nesse contexto, Teles (2001) destaca que as catástrofes naturais têm representado uma ameaça para o desenvolvimento dos países ao afetarem o território, a própria população e o desenvolvimento humano, que, em geral, terão, a médio e longo prazo, consequências sociais e econômicas. Assim, os governantes verão limitada a capacidade de gestão dos recursos do seu território e as populações verão aumentada a sua vulnerabilidade, podendo instalar-se no seu seio estados de alguma insegurança; o risco é consubstancial às sociedades industriais e pós-industriais contemporâneas, defendendo que a sociedade do risco surge quando os sistemas de normas e as instituições sociais falham no momento de assegurar a segurança prometida (Wisner *et al.*, 2004).

Dessa maneira, os desafios na gestão dos riscos no território são constantes na sociedade contemporânea perante a multiplicidade dos perigos com que a sociedade tem de lidar e é de importância vital o desenvolvimento de uma cultura de risco onde devem imperar os conceitos da precaução, da prevenção e da mitigação, sendo necessário apostar na análise e na gestão como peças fulcrais no planejamento de emergência e na redução dos riscos (Barros, 2010).

Com efeito, a análise dos riscos deve ser um processo multidisciplinar, onde se encontram e se cruzam diversas fontes do saber, incorporando elementos das Ciências Sociais e Humanas (Economia, Geografia, Sociologia), das Ciências

Naturais (Biologia, Geografia, Geologia, Meteorologia), das Ciências Matemáticas (Estatística) e vários ramos da Arquitetura e da Engenharia.

Nesse ponto de vista, Queirós *et al.* (2006) destacam que em Geografia estudos de distribuição dos riscos têm recentemente colocado ênfase nas áreas de elevada concentração populacional ou em localizações inadequadas para realização de atividades humanas, com a preocupação ao apoio no ordenamento do território no que respeita aos processos de avaliação e gestão dos riscos.

A ocupação e o desenvolvimento das atividades humanas no território em setores de leito de inundações, em vertentes sujeitas a deslizamentos de terras, em locais próximos às indústrias e de rotas de transportes perigosos expõem as populações aos perigos e os mais pobres tornam-se mais vulneráveis. Assim, há que salientar que o nível de moradia e de renda da população, o grau de instrução e nível cultural são fatores que influenciam no quesito vulnerabilidade.

Para Dunning *et al.* (2011), as pessoas mais vulneráveis (pobres, crianças, idosos e deficientes) pertencem a grupos que geralmente possuem baixos recursos financeiros para se preparar para uma inundação fluvial, vivem em locais de maior risco, em condições de submoradia e não possuem o conhecimento ou ligações sociais e políticas para aproveitar os recursos que acelerariam sua recuperação. Sendo assim, os fatores como a pobreza, a desigualdade social, o acesso à saúde, aos recursos e ao *status* social provavelmente determinarão a vulnerabilidade das comunidades e dos indivíduos a uma variedade de perigos.

Nesse ponto de vista, vale salientar que a vulnerabilidade social dependerá da natureza do perigo em que o ser humano está exposto; embora a vulnerabilidade social não seja uma função da gravidade do risco ou da probabilidade de ocorrência, certas propriedades de um sistema o tornarão mais vulnerável a certos tipos de perigos do que a outros. Por exemplo, a qualidade da habitação será um determinante importante da vulnerabilidade (social) de uma comunidade a inundações fluviais ou a tempestades de vento, mas é menos provável que influencie sua vulnerabilidade às secas (Brooks, 2003).

No contexto da vulnerabilidade, em números de pessoas atingidas e dos danos causados decorrentes da ação dos fenômenos perigosos, no período 1992 a 2012 os perigos naturais afetaram $4,4 \times 10^9$ pessoas, mataram 1,3 milhões e causaram 2×10^{12} dólares em perdas econômicas; nesta contabilização os afetados são: a soma de pessoas feridas, sem abrigos e que necessitam de assistência imediata num período de emergência, pessoas deslocadas ou evacuadas; os mortos incluem pessoas confirmadas como mortas, supostamente mortas e desaparecidas; as perdas econômicas apresentadas são valores estimados (UNISDR, 2012a). Em relação aos desastres naturais, o ano 2002 registrou o maior número de pessoas afetadas (659,26 milhões) e 2011 foi ano com maior perda econômica, que totalizou $364,09 \times 10^9$ dólares (EMDAT, 2017).

Desse montante de pessoas afetadas por desastres naturais, dois terços pertencem a países subdesenvolvidos, onde as populações se encontram mais expostas e vulneráveis. Dessa forma, os custos associados aos impactos econômicos decorrente dos desastres naturais têm se dado em paralelo com o movimento das populações para as zonas costeiras, aumentando a vulnerabilidade aos perigos naturais. Esta situação é evidente, por exemplo, com a passagem dos furacões Katrina em 2005, Irene em 2010 e Sandy em 2013, em que as comunidades sofreram intensamente com inundações e com tempestades (Pine, 2014).

Assim, as perdas ocorridas nos desastres são resultantes da relação entre o evento perigoso e as características dos elementos expostos que os tornam suscetíveis aos danos (Dilley *et al.*, 2005), em que o potencial destrutivo de um fenômeno perigoso é função da magnitude, da duração e da localização (Burton *et.al.*, 1993).

Além disso, o aumento da população mundial e os avanços tecnológicos alcançados ao longo das últimas décadas originaram um aumento da intervenção antrópica no território, proporcionando na maioria dos casos um aumento do desenvolvimento de novas situações de risco.

Sendo assim, torna-se necessário o conhecimento detalhado do funcionamento dos fenômenos perigosos e a avaliação dos efeitos potenciais de modo a minimizar os danos, através da relocação das populações, das atividades econômicas e das infraestruturas com implementação de medidas de mitigação e uma correta gestão do território no que respeita às futuras intervenções humanas. Para tanto, a identificação e delimitação das áreas perigosas e de risco, no quadro do ordenamento e da gestão do território, constituem condições indispensáveis para a prevenção e minimização dos prejuízos decorrentes dos fenômenos e atividades perigosas (Zêzere *et al.*, 2006).

1.2 Conceitos associados à avaliação multi-perigo

Diante da recorrência dos fenômenos naturais perigosos no território tem-se a relevância nas investigações dos perigos naturais, onde vale destacar as terminologias utilizadas na temática da avaliação dos riscos, assim como dos múltiplos perigos.

Nesse contexto, buscou-se neste tópico descrever as terminologias e conceitos da temática da tese onde se inseriu a contextualização, essencialmente na definição do risco, da suscetibilidade, da perigosidade, da vulnerabilidade e dos elementos expostos, da avaliação multi-perigo e do multi-risco. Para tanto, são apresentados os conceitos a partir da literatura pesquisada.

Assim, como ponto inicial procurou-se definir o conceito de risco que, segundo *World Meteorological Organization - WMO* (1999), são as perdas esperadas (de vidas, pessoas feridas, propriedade danificada, e da atividade económica interrompida) devido a um perigo numa determinada área e período de referência. O conceito de risco com base em cálculos matemáticos é definido pelo produto entre a perigosidade, a vulnerabilidade e os custos dos elementos em risco. O conceito é mais utilizado como risco específico, definido pelo grau de perdas

decorrente da atuação do fenômeno natural expresso pelo produto da perigosidade e da vulnerabilidade (Varnes, 1984).

Dessa maneira, o risco geralmente é aceito e dependente da probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos sobre as consequências esperadas (Baecher & Christian, 2003).

Com efeito, para Di Mauro *et al.* (2006) a avaliação do risco é definida pela complexa variedade de combinação dos riscos, de vários perigos (combinação de multi-perigos naturais e tecnológicos), várias combinações de vulnerabilidades (população e prédio vulneráveis, vulnerabilidade multicultural, ambiental e de áreas urbanas complexas) coincidente no tempo e no espaço.

Dentre da concepção de risco, Tavares & Cunha (2009) expressam que este exprime a possibilidade de ocorrência e a respetiva quantificação em termos de custos, de consequências gravosas, econômicas ou mesmo para a segurança das pessoas, em resultado do desencadeamento de um fenômeno natural ou induzido pelas atividades antrópicas.

Também na sequência dos conceitos da avaliação dos riscos, tem-se a suscetibilidade, definida como a propensão de ocorrer numa dada área um fenômeno natural perigoso de acordo com as condições do terreno (Soeters & Van Westen, 1996). Nesse sentido, é o grau em que uma área pode ser afetada por eventos perigosos futuros, ou seja, uma estimativa de "onde" os eventos provavelmente ocorrerão. A suscetibilidade não considera a probabilidade temporal do evento, ou seja, não permite calcular com que frequência os eventos perigosos poderão ocorrer (Santangelo *et al.*, 2011). Em acordo com o essencial das interpretações anteriores, Julião *et al.* (2009) definem a suscetibilidade como a incidência espacial do perigo e representa a propensão para uma área ser afetada por um determinado fenômeno perigoso, em tempo indeterminado, sendo avaliada através dos fatores de predisposição para a ocorrência dos processos ou ações, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência.

Nos conceitos de avaliação de risco é a perigosidade que leva em consideração a incidência espacial e temporal, assim como a probabilidade de ocorrência do fenômeno perigoso. Segundo a definição de Varnes (1984), a perigosidade é a probabilidade de ocorrência de um fenômeno perigoso numa determinada área e num determinado período. É a possibilidade de ocorrer um evento perigoso e causar prejuízos e danos numa unidade de tempo. Consequentemente, o perigo é expresso pela probabilidade de ocorrência de um evento numa determinada magnitude (Crozier, 2013).

Associado à incidência dos fenômenos perigosos em áreas sensíveis no território, a vulnerabilidade é o grau de perda de um elemento ou conjunto de elementos vulneráveis, resultante da ocorrência do fenômeno natural perigoso ou induzido pelo Homem (UNDRO, 1979). De acordo com Varnes (1984), a vulnerabilidade é o grau de perda expectável dos elementos em riscos, como resultado da ação do fenômeno natural perigoso numa dada magnitude e expresso na escala de 0 (sem danos) a 1 (total de danos). Além disso, o Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (PDNU, 2004) define a vulnerabilidade como porções do espaço físico, social e econômico a sofrer danos em consequência dos impactos de fenômenos potencialmente perigosos. A vulnerabilidade é descrita como a suscetibilidade dos elementos expostos aos danos devido ao evento perigoso (OECD, 2012b).

Assim, em seguimento aos conceitos abordados da vulnerabilidade têm-se os elementos em risco (ou elementos vulneráveis), representados pela população, equipamentos, propriedades e atividades econômicas vulneráveis num território; e os elementos expostos, mas vulneráveis, incluem pessoas, infraestruturas e usos da terra economicamente ou ambientalmente importantes (Varnes, 1984).

Assim, na sequência dos conceitos supracitados, nesse ponto se destaca a definição e a diferenciação da avaliação multi-perigo e do multi-risco no sentido de explicar os dois conceitos e sua inter-relação. Para tanto, a avaliação multi-perigo pode ser dividida em duas possíveis linhas de aplicações: multi-perigo visto como

o processo de avaliação de diferentes perigos independentes que ameaçam uma determinada área (comum); multi-perigo visto como o processo para avaliar possíveis interações ou efeitos em cascata entre os diferentes eventos perigosos (Garcia-Aristizabal *et al.*, 2013). A avaliação multi-perigo é uma metodologia para determinar os efeitos da ação conjunta e/ou sequencial de fenômenos naturais e/ou tecnológicos nos elementos expostos, favorecendo a identificação da vulnerabilidade no território.

Sendo assim, o multi-perigo é o primeiro passo para a aplicação metodológica do multi-risco (Gallina, 2015). Na avaliação multi-risco a estimativa de perdas irá incluir a determinação da extensão do dano direto à propriedade e os efeitos indiretos sobre o uso funcional. No âmbito da interação ao nível dos perigos (multi-perigo) é proposta a distinção formal entre o perigo individual, sem interação, e a avaliação multi-perigo completa (Marzocchi *et al.*, 2012). A análise multi-perigo (*multi-hazard analysis*) é a aplicação de abordagens metodológicas tendo como base o mapeamento da ocorrência potencial de diferentes tipos de perigos naturais numa determinada área (Delmonaco *et al.*, 2006). Desta forma, o multi-risco está relacionado com os múltiplos riscos econômicos, ecológicos, sociais, entre outros (Kappes *et al.*, 2012a), decorrentes de diferentes fenômenos perigosos.

Ainda merece ressaltar na perspectiva de avaliação multi-perigo, a concepção e importância do desenvolvimento de um sistema de monitoramento e alerta de multi-perigo denominado *Developing multi-hazard early warning: check list* (UNISDR, 2006) numa rede internacional de sistemas de avisos dos multi-perigos (*International Network for Multi-hazard Early Warning Systems* - IN - MHEWS).

O IN-MHEWS está estruturado em 4 elementos: aquisição, coleta de dados e informações de riscos de desastres de forma sistemática; detecção, monitoramento e análise, previsão de ocorrências dos perigos e de possíveis consequências; divulgação e comunicação por fontes oficiais da possibilidade de impactos dos perigos; preparação em todos os níveis para responder aos avisos de alertas recebidos (WMO, 2018).

Assim, as reduções de perdas de vidas e de danos nas infraestruturas estão inseridas na avaliação dos riscos, que necessitam de novas abordagens e avanços metodológicos que envolvam a integração dos múltiplos perigos no território e que dêem subsídios à mitigação e gestão dos riscos no território.

A investigação torna-se cada vez mais necessária e de grande importância na avaliação dos perigos naturais, visto as tendências globais dos danos serem crescentes e estarem a aumentar, assim como as perdas por desastres. Tais tendências crescentes em intensidade e frequência dos desastres naturais são observadas em todo o mundo (Etkin, 1999; Swiss Re, 2012; Downton *et al.*, 2005; Barredo, 2007; Michel-Kerjan *et al.*, 2013).

1.3 Estudos de avaliação multi-perigo

A partir das definições dos conceitos de avaliação dos múltiplos perigos e riscos buscou-se nesse ponto destacar os trabalhos que envolvem a temática na perspectiva de apresentar os avanços das investigações científicas no campo da avaliação multi-perigo (*multi-hazard*); destacam-se, assim, alguns trabalhos desenvolvidos durante a última década e meia principalmente no âmbito de organizações nacionais e internacionais.

Nessa ótica, a avaliação integrada dos perigos no contexto dos riscos é um campo de investigação relativamente novo e até agora pouco desenvolvido por especialistas de diferentes formações numa linha de pesquisa multidisciplinar. Assim, buscou-se fazer uma breve descrição da evolução e o estado atual do conhecimento do multi-perigo.

Nesse contexto, Greiving *et al.* (2006) destacam que desde a década de 1970 os geógrafos já tinham desenvolvido uma abordagem espacial de avaliação dos riscos, com o método denominado *hazards of place*.

De maneira geral, nos trabalhos que tratavam da análise dos riscos, as análises dos perigos eram, na grande maioria, tratadas individualmente. Segundo Grünthal *et al.* (2006), no início as avaliações dos perigos naturais eram geralmente realizadas para os vários fenômenos perigosos pertinentes nas regiões ou cidades consideradas sem os tentar combinar entre si. De acordo com Marzocchi *et al.* (2009), nestas primeiras avaliações não havia integração entre os diferentes perigos no território, e eram aplicadas diferentes metodologias de avaliação para os mesmos perigos.

A avaliação individual dos perigos pode resultar num valor final menor do risco e, nesse sentido, a integração dos perigos (multi-perigo) pode aumentar o valor final do risco (Marzocchi *et al.*, 2012; Eshрати *et al.*, 2015). Assim, deparamo-nos com desafios no desenvolvimento de modelos geográficos a partir de novas metodologias para a avaliação multi-perigo no território.

A avaliação multi-perigo tem sido fortemente elaborada através de modelos geográficos em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Nesse sentido, para a *Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE)*, os modelos muito raramente aprofundam as relações temporais, espaciais ou causais que ocorrem com frequência entre os perigos, como também o tempo-dependência ou a dinâmica da natureza e da vulnerabilidade (OECD, 2012a).

1.3.1 Abordagens metodológicas à avaliação multi-perigo

A seguir, os trabalhos que envolvem a avaliação do multi-perigo são apresentados de forma sequencial por ordem de tipos de perigos trabalhados em comum, desenvolvidos num contexto geográfico global, como também as investigações são descritas numa menor dimensão territorial em escalas de regiões, cidades, setores regionais de vertentes, faixa de costa, vulcões ou num contexto de bacias hidrográficas.

No contexto de um país, insere-se o trabalho Bell & Glade (2004); diante das ocorrências dos fenômenos perigosos em Westfjords, na Islândia, avaliaram os fenômenos naturais perigosos – avalanches de neve, escoadas de detritos (*debris flow*), desabamentos (*rock falls*) –, que ameaçam pessoas e bens – propriedades e infraestruturas – ao longo de parte da área da comunidade Bildudalur. A vulnerabilidade foi calculada de acordo com a magnitude do perigo, a perigosidade foi definida como alta para o período de retorno de 10 anos e baixa para 150 anos, os valores dos elementos em risco foram definidos pelo seu valor econômico. Nessa avaliação, os autores concluem que seria mais adequado utilizar intervalos menores de recorrência (menores períodos de retorno) para os perigos avaliados, principalmente para o perigo de avalanche, que é mais frequente.

Em outra contribuição para a pesquisa do multi-perigo, associada à utilização de novas tecnologias, destaca-se o trabalho de Chen *et al.* (2016). Os autores conceberam e desenvolveram uma plataforma de avaliação multi-perigo de âmbito regional onde se faz a integração de perigo de escoadas de detritos e de ruturas de vertentes induzidas pela precipitação, em contexto de estabilização sísmica prévia, numa pequena área montanhosa na China (província de Sichuan). Aqui, foram identificadas as rodovias expostas ao multi-perigo e foi constatado que em situações de tempestade as ameaças crescem associadas ao aumento do volume de detritos transportados. Nesse estudo, foi calculado o risco social decorrente das ruturas de vertentes e escoadas de detritos ao longo da rede viária.

Noutra avaliação multi-perigo, Kappes *et al.* (2012a) integraram perigo de movimentos de vertentes (deslizamentos superficiais e de escoadas de detritos) e de cheias, com vista à avaliação da vulnerabilidade de edifícios, no município de Faucon, localizado na bacia hidrográfica de Barcelonnette (Alpes franceses, sudeste de França). Assim, a ocorrência espacial dos perigos naturais foi associada aos elementos expostos (edifícios); para tanto, foi utilizado o método PTVA (*Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment*), um indicador de vulnerabilidade desenvolvido e aplicado a contextos multi-perigo. Para a área de

estudo, foram determinados os perigos naturais relevantes de acordo com o seu histórico de ocorrência e, em seguida, feita a determinação dos indicadores, dos pesos, fatores e o efeito da interação dos perigos naturais sobre a vulnerabilidade global. Como resultado, também se identificou a vulnerabilidade específica das áreas edificadas, os pontos críticos (*hotspots*), o que pode favorecer a tomada de decisão e contribuir nos esforços para as medidas de redução dos riscos.

Schuster (1995) destaca que os barramentos formados por deslizamentos ocorrem em numerosas regiões do mundo e resultam em consideráveis perigos de inundações fluviais. Neste contexto, destaca-se o estudo de Yang *et al.* (2013), realizado no sul de Taiwan, em que foi avaliado o perigo de inundações associado à ocorrência de deslizamentos nos vales contíguos aos canais fluviais, quer a montante do barramento, por elevação do nível da água no rio, quer a jusante, por rompimento dessa estrutura temporária. O perigo de inundação foi avaliado através da criação de um índice, que incorporou à altura de inundação, a velocidade de escoamento e a taxa de subida da água. A atribuição de ponderações para cada um destes fatores foi baseada no método AHP (*Analytic Hierarchy Process* ou Processo Analítico Hierárquico). Nesse estudo, foi utilizado um índice potencial de perigo de inundações, que compara o pico instantâneo de vazão e a descarga admissível em cada secção do rio. O modelo de avaliação foi testado para o vale a montante do deslizamento-barreira de Xiaolin, permitindo, de acordo com a altura de água no vale e com o tempo de chegada da inundação, classificar o vale em diversos níveis de perigo, e estabelecer a relação espacial com as diversas povoações potencialmente afetadas.

Em contexto espacial de bacia hidrográfica, do rio Lesser, nos Himalaias, Rawat *et al.* (2012) realizaram a integração dos perigos naturais tendo por base o sistema de banco de dados computacional *Geo-Hydrological DBMS* estruturado por três módulos em SIG: o *geo-informatics*, onde são inseridas as variáveis geologia, geomorfologia, solos, declividade e uso do solo; o *hydro-informatics*, que recebe os dados hidrossedimentológicos (precipitação, vazão, cota de cheias, balanço

hídrico, carga de sedimentos e erosão anual e total); e o módulo de processamento de dados *hazard-informatics*, onde foram calculados os perigos naturais (seca, cheias, erosão e deslizamentos). A integração dos perigos naturais foi feita por sobreposição em SIG, associados aos parâmetros socioeconômicos e ambientais (padrão de uso do solo, redes de estradas, armazenamento de água potável e rede de fornecimento de água). Assim, os autores identificaram que as terras estéreis intensificam a erosão e a magnitude das cheias na estação chuvosa e levam a consequências negativas ambientais e socioeconômicas. No entanto, nas áreas de florestas os perigos naturais e as consequências socioeconômicas e ambientais foram baixas.

Acrescenta-se também, na perspectiva global dos riscos e ainda mais ampla, a avaliação multi-risco e metodologia desenvolvida no projeto ARMONIA - *Applied Multi-Risk Mapping of Natural Hazard for Impact Assessment* (Delmonaco *et al.*, 2007), que integra diversos perigos: cheias, deslizamentos, sismos, vulcanismo, incêndios florestais. Assim sendo, foram obtidas a intensidade, frequência, localização dos perigos, associadas aos índices e pesos dos elementos expostos e às mudanças climáticas. Assim, os perigos foram integrados por análise multicritério, que proporciona a análise dos perigos, da vulnerabilidade e dos riscos. Para tanto, a metodologia pode fornecer suporte à decisão a partir da projeção de cenários futuros de multi-risco na Europa.

No mesmo contexto continental e de integração ainda maior dos múltiplos perigos naturais à escala da Europa foi elaborado o projeto ESPON (*European Spatial Observation Network*) coordenado Schmidt-Thomé (2006), onde foi realizada a integração dos perigos naturais (avalanches, secas, terremotos, temperaturas extremas, cheias, incêndios florestais, deslizamentos, tempestades costeiras, *tsunamis*, erupções vulcânicas e tempestades) e tecnológicos (acidentes de tráfego aéreo, acidentes no processamento, transporte e armazenamento de petróleo, centrais de energia nuclear). Para tanto, utilizou-se o método Delphi para o cálculo da importância relativa (ponderações) dos perigos; a intensidade foi

estabelecida pela combinação da probabilidade com a magnitude de eventos passados e, em seguida, foi associada aos indicadores de vulnerabilidade (renda *per capita* e a densidade populacional) para obter as classes regionais de risco.

Em outros estudos de multi-perigo associado a fenômenos atmosféricos e num contexto mais amplo de integração dos perigos naturais e num contexto geográfico global acrescenta-se o trabalho elaborado por Dilley *et al.* (2005), trabalho este intitulado *Natural Disaster Hotspots A Global Risk Analysis*, financiado pelo Banco Mundial (*WorldBank*), identificaram os pontos críticos (*hotspots*) de exposição global aos perigos de cheias, secas, ciclones, terremotos, deslizamentos e os locais de alto risco de mortalidade e de perdas econômicas. Para tanto, foi estimada a população que vive em área afetadas pelos perigos. Em seguida, foi obtida a localização específica de mortalidade por intersecção entre a taxa do perigo global específico (*global hazard-especific rate*) e a população para cada tipo de perigo (*hazard*). Foram atribuídas ponderações para cada perigo e efetuada a sua soma, obtendo-se, assim, o índice do multi-perigo (*mortality-weighted multihazard disaster hotspot*).

Dessa maneira, foram utilizados indicadores da população e do produto interno bruto representado por unidade de área (por células). Assim, ambos os riscos de mortalidade e de perdas econômicas foram calculados em função da frequência dos perigos (*hazard*) naturais e das perdas esperadas decorrentes do evento perigoso. A vulnerabilidade foi obtida a partir do perigo específico (*hazard-especific*) da mortalidade em 20 anos de dados (1981 – 2000) do EM-DAT (*Emergency Events Database*) e das taxas de perda econômica regional, para os países com base no Banco Mundial.

Noutra avaliação mais complexa do multi-perigo no território da República da Geórgia, Varazanashvili *et al.* (2012) integraram os perigos recorrentes no país: sismos, movimentos de massa em vertente, avalanches de neve, cheias rápidas, secas, furacões, relâmpagos, granizo, geada e nevoeiro. Esses perigos foram definidos no contexto do projeto RNDMR, onde foi criado o banco de dados digital

de perigos naturais (DBND) no território da Geórgia, caracterizados de acordo com os vários parâmetros, entre os quais a magnitude e a frequência. Também foi obtida a vulnerabilidade no contexto físico, ao avaliar a resistência dos elementos expostos a ação dos fenómenos perigosos. O multi-risco foi calculado pela relação tempo/espço, frequências e magnitudes dos desastres naturais e pela correlação entre perdas econômicas, exposição física, e a estimativa da vulnerabilidade geral, que permitiu o cálculo do multi-risco para os seis perigos naturais que ocorrem no território da Geórgia. Os perigos foram generalizados para todo o país e o modelo da perigosidade foi gerado a uma escala regional, com valores gerais, o que dificulta uma avaliação detalhada dos perigos.

Zhou *et al.* (2015) desenvolveram a avaliação multi-perigo para os perigos naturais seguintes: terremotos, cheias, secas, temperaturas baixas, neve, vento forte e granizo. Para tanto, foram elaborados mapas de índices (indicadores) de risco de desastres - *Chinas' Disaster Risk Index* (CDRI) -, a partir da integração dos componentes: i) exposição aos perigos naturais (população, área edificada, infraestruturas, setores ambientais); ii) índice de vulnerabilidade que inclui os aspectos físicos, econômicos e ambientais que colocam pessoas ou o sistema susceptível ao perigo e consequências adversas que englobam a capacidade de recuperação dos danos (*coping capacity*), de adaptação aos fenómenos perigosos (*adaptive capacity*) e incorpora o fator social dos elementos em risco, tendo por base as 31 províncias da China como unidades de análise. Os indicadores foram definidos com base nos dados do anuário estatístico e de seguradoras da China dos anos 2008 a 2010, em referências bibliográficas; a exposição física foi calculada a partir do somatório da média anual da população afetada pelo perigo (*hazard*) e dividido pelo produto da multiplicação do número de desastres e do tempo de duração. Com a integração dos componentes foi calculado o CDRI através da multiplicação da exposição aos riscos e o índice de vulnerabilidade (*susceptibility, coping capacity e Adaptive capacity*).

Os resultados foram apresentados em 5 intervalos de classes em percentil e identificaram-se os pontos críticos de nível de risco alto na região sudoeste, central e nordeste da China significativamente mais altos do que nas regiões leste, norte e oeste do país.

E ainda no contexto geográfico de um país se insere o trabalho de Liu *et al.* (2013); com base no banco de dados de 1950 a 2010, avaliaram a probabilidade de perdas de vidas associadas aos vários perigos: furacões, cheias, secas, terremotos e deslizamentos, através do modelo de probabilidade de excedente (EP) de riscos de multi-perigo (*The exceedance probability of multi-hazard risk model*). Os resultados foram apresentados para os 16 municípios em métodos gráficos de probabilidade excedente (%) e mortes por milhões de pessoas; com o uso de SIG foram elaborados mapas de multi-perigo de diferentes cenários com período de retorno de 10, 20 e 50 anos e também foi obtida a vulnerabilidade.

Num mesmo contexto do trabalho anterior (região do delta do rio Yangtze, na China), Liu *et al.* (2016) avaliaram diversos perigos naturais em conjunto: cheias (lentas e rápidas), vento forte, inundações costeiras e deslizamentos de terra. Os perigos foram incluídos no cálculo do risco de perdas de vida e de perdas econômicas; portanto, a interação dos perigos foi calculada pela probabilidade e magnitude dos perigos ocorrendo juntos, de acordo com os fatores desencadeantes através das relações seguintes: *Independente*, onde as mudanças nos fatores desencadeantes que induzem o perigo A são independentes daqueles que induzem o perigo B, mas se as mudanças desses fatores ocorrerem juntos, os perigos A e B ocorrem juntos; *Mutex*, em que os perigos não podem acontecer juntos; *Paralela*, em que um fator desencadeante tem a possibilidade de induzir um ou outro perigo ao mesmo tempo; e *em Série*, em que o perigo A induz as mudanças em alguns fatores desencadeantes e também induz o perigo B, assim como há possibilidade de um perigo A e B ocorrerem juntos.

Nesta avaliação de múltiplos perigos e dos riscos optou-se por considerar que os perigos ocorrem numa relação em paralelo, pois as tempestades atuantes na região englobam a velocidade do vento e a precipitação, sendo o fator desencadeante de um grupo de perigos, e qualquer alteração na magnitude e frequência dos fatores desencadeantes induzem alterações nos respectivos perigos. Dessa forma, as relações entre os perigos foram sistematizadas pela primeira vez no campo de pesquisa na avaliação multi-perigo e dos riscos (*Multi-hazard risk assessment*).

No contexto de áreas urbanas apresenta-se o projeto AGSO *Cities* (Granger *et al.*, 1999; Middelmann & Granger, 2000; Granger & Hayne 2001), o qual incide na avaliação de riscos geológicos no estado de Queensland, Austrália. Estes trabalhos utilizaram como exemplos as cidades de Cairns, Mackay e South-East Queensland, onde foram identificados os perigos de terremoto, de deslizamentos de terras, de cheias, de ventos ciclônicos destrutivos e de ondas de maré (galgamentos oceânicos) causadas por tempestades marítimas (*storm surge*). A partir desses perigos naturais foram definidos os perfis de risco total para as áreas urbanas, tendo em conta a vulnerabilidade de toda a comunidade.

Barua *et al.* (2016), desenvolveram em Bangladesh a avaliação de acordo com os danos provenientes dos perigos naturais: tornados, inundações fluviais, terremotos e ciclones. Dessa maneira, para cada perigo foram determinados os fatores e pesos, a escala de intensidade e níveis de danos definidos com base no banco de dados histórico de desastres para cada distrito e a decisão final tomada a partir de entrevistas com especialistas. A classificação das variáveis (*risk score of a district*) foi calculada individualmente pela multiplicação do fator de perigo (*hazard fator*) pelo fator de peso (*weighting fator*) e, em seguida, integrados os perigos por soma. Assim, foi definido o mapa multi-perigo para 64 distritos de Bangladesh, o que pode ser a base para tomadas de decisão em cada distrito.

Os estudos multi-perigo têm sobrevivendo também no contexto das mudanças climáticas. As consequências das alterações climáticas no mundo têm sido objeto

de forte debate e, por isso, tem havido um esforço no sentido de incluir este fator nas avaliações de multi-perigo (Solomon *et al.*, 2007; Collins *et.al.*, 2012). Dessa maneira, as avaliações dos efeitos das mudanças climáticas na indução dos perigos e dos riscos naturais se dão a partir da inserção de cenários de mudanças climáticas nos modelos de avaliação multi-perigo.

Nesse ponto de vista, Forzieri *et al.* (2016) realizaram a nível regional na Europa a avaliação multi-perigo de ondas de calor e de frio, inundações fluviais e inundações costeiras, seca dos rios, incêndios florestais e tempestades de vento, associada aos cenários de mudanças climáticas do IPCC (*Intergovernmental Panel Climate Change*), com projeção para os anos 2020, 2050, 2080 a partir de diferentes simulações do Modelo Circulação Global - Modelo de Clima Regional (GCM-RCM - *Global Circulation Model-Regional Climate Model*) no cenário de emissões A1B de acordo com Solomon (2007).

A exposição aos perigos foi representada pela fração anual expectável de ser exposto ao perigo (EAFE - *Expected Annual Fraction Exposed*), que compara quantitativamente os múltiplos perigos caracterizados por diferentes processos baseados numa escala de tempo e de intensidade derivada da probabilidade de ocorrência de eventos extremos; para cada perigo foi calculado o nível específico de acordo com as projeções climáticas. Os perigos foram integrados por soma entre o EAFE e os indicadores de exposição, que resultou no índice de exposição global (OEI - *Overall Exposure Index*). Em seguida, foram identificadas as áreas com aumento de exposição aos múltiplos perigos (CEI – *Change Exposure Index*), que expressa o aumento futuro de EAFE representados em três limiares: moderado (20 %), forte (100 %) e extremo (1000 %).

Dentro da temática das alterações climáticas, a elevação do nível médio das águas do mar surge como uma das evidências mais fortes, pelo são particularmente relevantes todos os impactos que lhe estão associados (Cai *et al.*, 2009). Assim, nas regiões costeiras têm sido desenvolvidos diversos trabalhos de análise multi-perigo, os quais se incluem quase sempre uma perspetiva de elevação do nível

das águas do oceano associada às alterações climáticas. Nesse contexto, Appelquist & Balstrom (2015) desenvolveram uma nova metodologia para a avaliação de vários perigos costeiros, na perspectiva das mudanças climáticas, intitulada "*Coastal Hazard Wheel*" (CHW). A metodologia assenta num sistema de classificação baseado nos componentes biogeofísicos considerados mais importantes para as características de um determinado ambiente costeiro genérico: arranjo geológico, exposição à ondulação, amplitude de maré, flora/fauna, balanço sedimentar e tempestades tropicais, em que cada ambiente costeiro possui uma combinação específica dessas variáveis. Os componentes anteriores são integrados, de forma a obter uma avaliação dos principais riscos costeiros em um único processo e abrange os riscos de rotura do ecossistema, inundação progressiva, intrusão salina, erosão costeira e inundação por galgamento. A metodologia, desenvolvida para aplicação a qualquer contexto costeiro, foi testada em áreas específicas (costa do estado de Karnataka, Índia; costa do Djibuti), em que as variáveis nos setores costeiros foram mapeadas manualmente através de interpretação em imagens de satélites.

Na costa leste da Índia, na perspectiva da vulnerabilidade associada ao perigo de elevação do nível médio das águas do mar, Mahendra *et al.* (2010) identificaram, no distrito de Nellore, as populações vulneráveis às inundações frequentes decorrentes da elevação do nível do mar e de erosão costeira severa. A avaliação incidiu em gerar mapas de vulnerabilidade ao multi-perigo utilizando parâmetros do histórico das alturas das tempestades marítimas (*storm surge*), nível do mar no futuro, linha de costa futura com base em informação topográfica de grande escala. Nesse sentido, foi calculado o período de retorno de 50 anos das tempestades marítimas e de elevação do nível do mar e integrados os perigos pela soma das duas variáveis. Os resultados do mapeamento revelaram taxas de erosão de até 7 m/ano em alguns locais e taxas de acreção de até 14 m/ano em outros locais; foram ainda identificadas vastas áreas (1 708,36 km²) incluídas na zona de multi-perigo de elevação do nível do mar e de erosão costeira.

No mesmo setor da costa leste da Índia, no distrito de Balasore, Odisha, Mukhopadhyay *et al.* (2015) desenvolveram a avaliação multi-perigo dos seguintes fenômenos: erosão costeira, inundação por *storm surge*, elevação do nível médio das águas do mar, inundações costeiras, *tsunami* e terremotos. A integração dos perigos se deu por análise multi-critério e os autores concluíram que, naquele contexto geográfico, a erosão costeira e as inundações por *storm surge* são os dois maiores perigos. Os resultados obtidos dão base para as autoridades competentes no planejamento e no gerenciamento de medidas garantirem a segurança das infraestruturas e de vidas.

Islam *et al.* (2016) desenvolveram o índice de vulnerabilidade costeira (*CVI - Coastal vulnerability index*), ao longo da costa deltaica do rio Ganges e teve como base os parâmetros físicos classificados seguindo o *rank* entre 1 (muito baixa) e 5 (muito alta). O *CVI* foi calculado e utilizado numa avaliação semi-quantitativa com base nos sete parâmetros: geomorfologia, declive, taxa de alteração da linha de costa, taxa de subida do nível médio das águas do mar, amplitude média da maré, batimetria e altura do *storm surge*. De acordo com o grau de vulnerabilidade potencial para cada parâmetro, toda a linha de costa da área de estudo foi classificada de 1 (vulnerabilidade muito baixa) a 5 (vulnerabilidade muito alta). A integração dos fatores no cálculo de *CVI* foi determinada pela raiz quadrada do produto da multiplicação das variáveis e dividido pela quantidade de variáveis; os resultados de *CVI* foram apresentados em intervalos de classes definidos por quebras naturais. Os resultados de *CVI* indicaram que dos 286,2 km do setor de linha de costa analisados, 20,1 % possui vulnerabilidade alta e 17,5 % muito alta.

Com incidência particular nas erupções vulcânicas, vale destacar o trabalho desenvolvido por Thierry *et al.* (2008), que realizaram a avaliação multi-perigo no Monte Cameroon, na borda do Golfo da Guiné. Este vulcão ativo é sujeito a uma variedade de perigos naturais: erupções vulcânicas, instabilidade de taludes e terremotos. Vale destacar que vivem ou trabalham aproximadamente 450 mil pessoas em torno deste vulcão. Os perigos (instabilidade de vertentes, erupção

vulcânica e sismos) foram cruzados através de uma matriz de índices de intensidade e de frequência; em seguida identificaram-se as zonas críticas em termos de perigo, tendo sido integrados num mapa de perigo geológico. Assim, foram identificadas as áreas de influência do vulcão e os elementos expostos aos riscos (população, infraestruturas, escolas, centros comerciais, área de plantio) e os componentes do ambiente (vegetação, hidrografia, plantios).

A partir de trabalho anterior, foi desenvolvido por Neri *et al.* (2013) a avaliação dos perigos decorrente da ação no vulcão ativo em Kanlaon, nas Filipinas, onde vivem nas proximidades mais de 300 000 habitantes em aldeias situadas nas encostas ou perto da base do vulcão. Este vulcão tem o registro de 29 erupções desde o ano de 1866. Para tanto, nesse estudo, foram levadas em consideração 3 categorias de eventos perigosos: colapso de setores do vulcão, de probabilidade muito baixa; erupções avaliadas em termos de tipologia, frequência e considerando o histórico das erupções do vulcão; fluxos de lama (*mudflows*) ou de lavas (*lahars*) induzidos por fortes chuvas, pois o vulcão Kanlaon está localizado no cinturão equatorial que é afetado sazonalmente por monções. Dessa maneira, foi considerado que precipitações intensas na sequência de agitação vulcânica, em que se verifica deposição de cinzas, também podem, ocasionalmente, originar deslizamentos de terras e avalanches de lavas potencialmente destrutivas. Assim, foi construída uma matriz de ameaças para Kanlaon, onde os diferentes eventos perigosos são avaliados numericamente com base em suas frequências e impactos potenciais.

Para além da avaliação multi-perigo incidindo em fenómenos naturais perigosos, têm sido desenvolvidos trabalhos em que, para além dos perigos naturais, o foco incide também na integração de perigos tecnológicos. Nesse sentido, Lari *et al.* (2009), na região de Lombardia (Itália), a integração dos perigos naturais com os tecnológicos. Foram abordados os perigos que ameaçam a população economicamente ativa de Lombardia: de origem natural (deslizamentos de terras, avalanches, inundações, incêndios, sismos e meteorológicos); tecnológicos

(industriais); e os decorrentes de atividades humanas (acidentes em rodovias e de pessoas feridas no trabalho). Com efeito, para cada perigo desenvolveram-se indicadores que expressam o risco físico e a capacidade de enfrentamento ou a resiliência do sistema. Os pesos dos fatores (perigos) foram calculados pela combinação da alocação orçamentária (*budgetary allocation*), lógica *fuzzy*, *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*) e definidos pela avaliação por especialistas. Assim, o cálculo do risco físico (R_p – *Risk Physical*) dos deslizamentos, das cheias, das avalanches, das indústrias e dos sismos foram obtidos pelo produto da multiplicação da perigosidade (H), da vulnerabilidade (V) e do valor do elemento exposto (W) que incluiu o fator da área impactada (km^2); o risco de incêndio florestal foi calculado pelo produto do perigo (H), da vulnerabilidade (V) e o valor do elemento exposto (W); no cálculo do risco total (R_t – *total risk*) levou-se em consideração o *fator de agravamento* (F) obtido a partir da presença, distância e conexão aos serviços de emergência. Dessa maneira, foram identificadas as zonas e os pontos críticos dos riscos dominantes na região.

Nessa temática dos perigos tecnológicos, Omidvar *et al.* (2016) realizaram a avaliação do perigo de ocorrência de danos nas condutas de transporte de gás natural como resultado da ocorrência de terremotos. A elaboração do modelo se deu a partir das variáveis de falhas geológicas e da topografia e integrados com a probabilidade da ocorrência do tremor de terra afetar o gasoduto através dos dados de PGA (*peak ground acceleration*) e de PGD (*permanent ground displacement*). Foi considerado que o perigo de liquefação do gás e de fogo no gasoduto são dependentes da ocorrência dos tremores de terra, e a probabilidade de ocorrer chamas é decorrente do vazamento ou rompimento do gasoduto. Para obter a vulnerabilidade de cada conduta de transporte de gás natural, considerou o número de manutenções (quebra e vazamentos), os tremores de terra e as falhas no solo. Com efeito, foi obtida a taxa de reparo e a probabilidade de fissuras no solo por tremores e por liquefação do gás. A análise multi-perigo assentou na probabilidade de falhas nas condutas do gasoduto decorrentes de serem atingidas

pelos perigos em simultâneo (terremotos, liquefação dos gás e fogo no gasoduto), considerando um sismo de magnitude 6,7 na escala Richter.

Avaliação multi-perigo no Brasil

Apresentados os trabalhos sobre multi-perigo em vários contextos geográficos, a diferentes escalas e com abordagens distintas, buscou-se neste ponto mostrar o desenvolvimento desta temática no Brasil. Neste país, diante das condições geoambientais, sobretudo as de natureza climática (tropicalidade), associadas às formas de ocupação do território, criam condições substanciais que modificam o ciclo hidrológico, onde os impactos são mais perceptíveis nas cidades, que se encontram mais expostas aos perigos. Dessa forma, a estruturação do território fomenta a frequência e a magnitude dos fenômenos naturais, tais como os deslizamentos de terras e as inundações fluviais (Almeida, 2012).

Nesse sentido, no território brasileiro, os principais fenômenos relacionados a desastres naturais são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como inundações e enchentes, escorregamentos de solos e/ou rochas e tempestades. Estes fenômenos ocorrem normalmente associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados, nos períodos chuvosos, que correspondem ao verão na região sul e sudeste e ao inverno na região nordeste (Tominaga *et al.*, 2009).

Ainda assim, merece destaque a abordagem geográfica da vulnerabilidade e exposição das pessoas aos perigos naturais (cheias, deslizamentos de terras, seca e elevação do nível do mar), tendo como unidade de análise o Brasil. O estudo foi elaborado por Almeida *et al.* (2016), os quais desenvolveram o indicador de riscos de desastres no Brasil denominado DRIB- *Desaster Risk Index Brazil*. ODRIB total é calculado pela multiplicação da exposição aos perigos pelo produto da soma da vulnerabilidade (susceptibilidade, *comping capacity* e *adaptive capacity*) multiplicado por 0,33; a exposição aos perigos, a vulnerabilidade e DRIB total são apresentadas em classes definidas por quantis.

Com efeito, no Brasil, carece de trabalhos de investigação na perspectiva do multi-perigo, sejam de origens naturais e/ou tecnológicos; os poucos trabalhos elaborados na grande maioria carecem da análise integrada dos fenômenos naturais perigosos, assim como carecem da avaliação multi-perigo na perspectiva do efeito em cascata. Como também, deve haver maior atenção na definição dos conceitos e terminologias, da perigosidade, da suscetibilidade, dos elementos expostos e dos riscos no consenso da literatura internacional.

Feita a descrição dos trabalhos que envolvem a elaboração de novas metodologias são apresentados a seguir os trabalhos de multi-perigo e o multi-risco que envolvem ferramentas em plataforma *WebSIG*.

1.3.2 Ferramentas e plataformas Web na avaliação multi-perigo

O advento de novas tecnologias tem contribuído para a análise integrada dos fenômenos naturais perigosos fornecendo subsídios aos usuários e gestores para a minimização dos danos materiais e perdas de vidas no território. Assim, se observa que os trabalhos têm sido desenvolvidos em contextos geográficos distintos e em diferentes escalas – continental, regional e local – apresentados a seguir em ordem cronológica.

Um dos exemplos é o serviço de dados (*WebService*) desenvolvido no âmbito do projeto *Mediterranean Grid of Multi-Risk Data and Models* (MEDIGRID), financiado pela Comissão Europeia. O MEDIGRID é descrito particularmente em dois modelos, um hidrológico – SHETRAN (*Systeme Hydrologique Europeen*) – e outro de propagação de incêndios – FSE (*Fire Spread Engine*) – direcionado para avaliação de Incêndios florestais. O modelo FSE foi desenvolvido para efeitos da propagação do fogo nas florestas e o SHETRAN para os impactos da erosão dos solos, de cheias rápidas, de deslizamentos de terras e de regeneração da vegetação nas áreas atingidas por incêndios florestais. A utilização da plataforma MEDIGRID de integração dos modelos (SHETRAN e FSE) deu-se no município

de Valencia de Alcântara, na região espanhola da Extremadura. O uso do sistema foi aplicado num local onde um grande incêndio florestal ocorreu em 2 de agosto de 2003. Assim, a plataforma MEDIGRID marca um avanço na integração de modelos direcionado para a avaliação multi-perigo (Bovolo *et al.*, 2009).

A iniciativa *Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment* (CAPRA) (<https://ecapra.org/>) é uma metodologia técnica e científica de informação em WebSIG, composta por ferramentas de avaliação e comunicação de risco para diversos níveis territoriais, desenvolvida para os países da América Central (Cardona *et al.*, 2010). Nesta plataforma, técnicas probabilísticas são aplicadas na análise de terremotos, *tsunamis*, furacões, inundações, deslizamentos de terras e vulcões. As variáveis espaciais que representam os fatores que determinam o perigo são combinadas com a exposição e a vulnerabilidade, permitindo assim que o usuário determine o risco simultaneamente numa inter-relação de multi-perigo.

Na Nova Zelândia destaca-se a ferramenta de análise regional RiskScape (<https://www.riskscape.org.nz/>), desenvolvida por um consórcio entre o *National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd* (NIWA) e o *GNS Science* (Schmidt *et al.*, 2011). Esta ferramenta de análise foi estruturada em três módulos de integração de perigos múltiplos: o *Hazard Module*, que integra os diversos perigos (terramotos, *tsunami*, cheias, ventos fortes e queda de cinzas vulcânicas); o *Vulnerability Module*, onde se inserem os elementos expostos (residências, rodovias e outros equipamentos urbanos); e o *Asset Module*, que faz combinação entre os perigos e os bens e, em seguida, são obtidos os *outputs* das propriedades afetadas, dos danos e das perdas por unidade de área.

Outro trabalho envolve a plataforma web de análise regional multi-perigo denominada MultiRisk, elaborada por Kappes *et al.*, (2012c), estruturada pela ferramenta de modelação (*MultiRisk modeling tools*) e análise dos perigos de fluxo de detritos (*debris flows*), de quedas de blocos (*rock falls*), deslizamentos superficiais (*shallow landslide*), avalanches e cheias (*river flood*). Esta ferramenta de modelação possibilita de forma rápida selecionar a parametrização e calcular

os perigos naturais e, na fase final do processo, realizar a validação a partir dos registros de eventos. Os perigos naturais são sobrepostos para a identificação do multi-perigo (*hotspots*) e os elementos expostos. Estas informações são disponibilizadas na *web* para os usuários e gestores através da ferramenta de visualização – Multi Risk *visualization tools* –, de apoio à identificação da extensão dos múltiplos perigos no território.

Como ferramenta de suporte à decisão e estratégias para os gestores dos riscos criou-se o *WebGIS tool for risk analysis* (Aye *et al.*, 2016); esta ferramenta é destinada à avaliação dos perigos naturais de cheias e movimentos em vertentes. Por meio do gerenciador *data management* são armazenados os dados dos perigos naturais, dos elementos em risco e da vulnerabilidade. Os dados são estruturados em tabelas com os períodos de retorno para cada perigo, os custos de reconstrução das infraestruturas, a caracterização da população e os dados dos elementos em riscos. A vulnerabilidade física é quantificada de acordo com a curva de intensidade e de danos (Fell *et al.*, 2005) do fenômeno perigoso, de 0 (sem danos) a 1 (dano total) para diferentes cenários de perdas a partir de diferentes períodos de retorno do evento perigoso.

Paralelamente, apresenta-se a ferramenta de prevenção de danos nas infraestruturas de transportes, elaborada no âmbito do projeto INFRARISK (Clarke & O'Brien, 2016), onde foram considerados os perigos de terremotos, de cheias e de deslizamentos de terras. Neste projeto foi desenvolvida a ferramenta de análise multi-perigo *online* INFRARISK *Decision Support Tool* (IDST) para os gestores e, dessa maneira, auxiliar nas tomadas de decisão e na proteção da rede de transportes rodovias, autoestradas, ferroviárias e demais infraestruturas de transporte (túneis, pontes, viadutos, rodovias pavimentadas).

1.3.3 Os estudos de multi-perigo em contexto de efeito de cascata

Os trabalhos descritos anteriormente, apesar de incidirem sobre vários perigos em simultâneo, carecem da abordagem metodológica na perspectiva causa e efeito, ou seja, são analisados individualmente e depois são “somados”, mas nunca se estuda um fenómeno perigoso como consequência de ocorrência de outro. Diante dessa lacuna na avaliação integrada dos diversos perigos naturais e/ou tecnológicos buscou-se trabalhos que abordem os múltiplos perigos na perspectiva do efeito em cascata ou em dominó.

No contexto deste “efeito cascata” (*cascading effects*), “cascata de eventos” ou “efeito dominó”, alguns perigos naturais impulsionam direta ou indiretamente a ação de outros fenómenos perigosos; integra-se a ação dos fenómenos naturais perigosos entre si e com as infraestruturas locais, barragens, núcleos urbanos, indústrias ou locais de armazenamento de materiais perigosos, entre outros. Assim, destaca-se a importância da avaliação do efeito em cascata na avaliação múltipla dos perigos naturais (Gallina *et al.*, 2016).

Mediante o exposto, a ação direta ou indireta de um evento perigoso resulta em novos eventos; por exemplo, se uma enchente interrompe a eletricidade para uma área e, como resultado da falha elétrica, um grave acidente de trânsito envolvendo um derramamento de materiais perigosos ocorre, as duas ocorrências constituem um evento em cascata (FEMA, 2011). Sendo assim, compreender o efeito em cascata ou efeito-dominó foi claramente identificado como uma necessidade importante por muitos investigadores e requer não só ferramentas de modelagem específicas, mas também ter de perto a interação e cooperação entre os diferentes campos de pesquisa de risco (OECD, 2012b). Os efeitos em cascata decorrentes da ação dos fenómenos naturais perigosos causam danos diretos e indiretos resultantes dos perigos secundários afetando pessoas que se encontram vulneráveis aos perigos no território.

Segundo Budimir *et al.* (2014), na contabilização das perdas de vidas causadas por perigos naturais, os deslizamentos (perigo secundário) desencadeados por abalos sísmicos (perigo primário) contribuem significativamente para o número de mortes associadas a terremotos.

Nesta concepção de interação entre os diferentes perigos, Gill & Malamud (2016) desenvolveram a concepção metodológica do fluxo de interação entre os perigos na perspectiva do efeito em cascata em três grupos: perigos naturais (terremotos, *tsunamis*, cheias, secas, deslizamentos, etc.), perigos das ações antrópicas (extração de água subterrânea, remoção da vegetação, urbanização, injeção de fluidos em solos, etc.) e perigos tecnológicos (ruptura de barragens, explosão industrial, poluição química, acidente de transporte, etc.). Este processo de interação entre os perigos foi desenvolvido pelos autores para 21 tipos de perigos naturais e foram identificadas 75 interações em que um perigo primário pode aumentar a probabilidade de ocorrência de outro perigo secundário.

As interações entre os três grupos de perigos são elaboradas de forma holística e representados num diagrama de fluxo do sistema terrestre numa cascata de eventos. A probabilidade de cada relação se resume nos processos de interações: probabilidade de ocorrência do perigo primário; a probabilidade do perigo primário desencadear um perigo secundário; a probabilidade de um determinado perigo conter outro perigo. Por exemplo, as tempestades podem impedir os incêndios florestais assim como a retirada da vegetação por ação humana diminui a probabilidade de incêndio florestal, e uma barragem pode conter as cheias num sistema de drenagem fluvial; estes processos são denominados de efeitos catalisadores ou de impedimento.

Choine *et al.* (2015) avaliaram os danos provocados por deslizamentos desencadeados por tremores de terra modelados na perspectiva do efeito em cascata. Para tanto, a avaliação multi-perigo teve como base: o modelo de declive, que incorpora as propriedades do solo e o cálculo da direção e a aceleração dos deslizamentos devido a ação da gravidade nas vertentes (*infinite slope*); *escalar*

model, que integra os dados de *Peak Ground Acceleration* (PGA) e magnitude do terremoto (M); *vector model*, que integra os dados de PGA e *Peak Ground Deformation* (PGD) associado ao valor de *infinite slope*. Através destes modelos foram estimados os danos nas infraestruturas locais (e.g. rodovias e pontes) de acordo com os valores de intensidade de PGA e PGD.

No projeto MATRIX (*New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe*), de âmbito europeu, buscou a integração dos perigos naturais (terremotos, deslizamentos, vulcões, *tsunamis*, incêndios florestais, tempestades, cheias e inundações costeiras). É uma ferramenta de suporte a decisão que engloba avanços na implementação da avaliação do multi-risco: i) estrutura probabilística dos eventos perigosos coincidentes, avaliados na perspectiva do efeito em cascata, assim como a dependência no tempo na vulnerabilidade e na exposição; ii) proposição de diretrizes para a implementação do multi-risco, utilizando o conceito de “Cidade Virtual” para testar conceitos básicos de multi-risco em um ambiente controlado, porém realista; iii) melhoria na compreensão dos requisitos difundidos do uso de ferramentas de multi-risco, com base nas lições aprendidas com o desenvolvimento do protótipo da plataforma MATRIX-CITY. Nesse sentido, fornece uma ferramenta de suporte à decisão aos *stakeholders* onde permite mostrar a posição e o índice total dos riscos em diferentes cenários (Mignan, 2013).

1.4 Síntese da avaliação multi-perigo

Com a revisão dos trabalhos relativos à avaliação multi-perigo e dos riscos, buscou-se, nesse ponto, elaborar a síntese descritiva dos trabalhos supracitados que utilizam metodologias com abordagens em diferentes contextos: âmbito geográfico, com trabalhos realizados em diversas escalas de análises (mundial, continental, supranacional, nacional, regional, local, etc.); unidades espaciais de análise (faixa costeira; montanhas; vales; área urbana, etc.); tipos de perigos

analisados de forma independente ou integrados e como são classificados os resultados; níveis de avaliação (suscetibilidade, perigosidade, vulnerabilidade, riscos, etc.); métodos utilizados na avaliação dos perigos e dos riscos no território. A síntese descritiva dos artigos consultados está apresentada de forma resumida nos Quadros 1.1, 1.2 e 1.3.

Como ponto de partida, buscou-se caracterizar os trabalhos que abrangem o desenvolvimento de ferramentas de análise dos múltiplos perigos e dos riscos na perspectiva de minimizar as perdas de vidas e os danos materiais no território, e a identificação dos pontos críticos, assim como a extensão dos múltiplos perigos naturais e tecnológicos no território, onde são disponibilizados em plataforma *web* para aos usuários, gestores e interessados *stakeholders*.

Nesse contexto, de acordo com as revisões da literatura (Quadro 1.1) observou-se que as ferramentas de apoio e análise dos múltiplos perigos e riscos são realizadas para cada perigo de forma independente e as perdas decorrentes dos perigos naturais e/ou tecnológicos são classificadas pela curva de frequência relativa e de danos (Aye *et al.*, 2016; Cardona *et al.*, 2010; Schmidt *et al.*, 2011). Por sua vez, Delmonaco *et al.* (2007), desenvolveram a integração dos riscos através de análise multi-critério numa matriz (probabilidade x impacto) dos riscos no âmbito geográfico supranacional.

Numa abordagem geográfica mundial dos múltiplos perigos, Dilley *et al.* (2005), calcularam o risco de mortalidade global com a soma dos perigos naturais ponderados pelo indicador de vulnerabilidade, do perigo de mortalidade e de perdas econômicas e os resultados foram classificados em decis.

Numa análise no âmbito regional em setores de vertentes e de fundo de vale, os perigos naturais foram definidos com o confronto dos registros espaciais dos fenômenos perigosos no processo de validação, e a exposição obtida por meio da sobreposição entre os perigos (Kappes, 2012c).

Noutra unidade espacial correspondente ao setor costeiro, foram analisados os múltiplos perigos de forma independente (Granger *et al.*, 1999; Middelmann & Granger, 2000; Granger & Hayne 2001).

Numa análise em escala regional, foram integrados os múltiplos perigos naturais de incêndios florestais e de cheias a partir de dois modelos de base física (Bovolo *et al.*, 2009) de estimativa da propagação de incêndio e o modelo hidrológico para o cálculo do perigo de erosão dos solos (mm/ano) e os resultados, nesse caso, são apresentados em 10 classes de intervalos iguais.

A integração entre os perigos naturais na avaliação multi-perigo foi elaborada por Schmidt–Thomé (2006), pela ponderação dos perigos por especialistas (método Delph) e a vulnerabilidade calculada pela relação da densidade populacional e do produto interno bruto (PIB); por correspondência regional, foram definidas as classes de risco para os países da Europa.

Desses trabalhos que envolvem o desenvolvimento de tecnologias e ferramentas *WEBSIG* em grande parte são desenvolvidos num contexto geográfico de maiores escalas: continental, países e regiões; os trabalhos incidem em sua maioria no nível de avaliação da perigosidade e com grande relevância para a vulnerabilidade e os riscos; os perigos mais trabalhados são as inundações fluviais, movimentos de vertentes e os sismos (Quadro 1.1).

Quadro 1.1 – Síntese das abordagens multi-perigo a partir de ferramentas e plataformas *web* que abordam os múltiplos perigos.

Contexto geográfico	Tipo de perigo	Classificação dos resultados	Nível de avaliação	Autores
Continental (Europa)	CH, DZ, SIS, EV, IF.	-	H, R e V	Delmonaco et al., 2007
Mundial	CH, SEC, CIC, SIS, EV, DZ.	Decil	E, H, R	Dilley et. al., 2005

Quadro 1.2 Continuação.

Contexto geográfico	Tipo de perigo	Classificação dos resultados	Nível de avaliação	Autores
País (Nova Zelândia)	CH, SIS, VF.	Frequência relativa da área afetada e Custos/km ²	R	Schmidt et al., 2011
Unidade hidrográfica	FD, CH.	Intervalos iguais de frequências e de perdas totais	R	Aye et al., 2016
Supranacional (América Central)	CH, DZ, EV, FUR, SIS, SEC, TSU.	Intensidade e frequência de danos	R	Cardona et al., 2010
Local	FD, QB, DZ, AV, CH.	Falso positivo e negativo	H	Kappes et al., 2012c
Regional e local	CH, SIS, CH, VF, DZ.	-	H, V	Granger et al., 1999; Middelmann & Granger, 2000; Granger & Hayne, 2001
Regional (Extremadura, Espanha)	IF, DZ, ES.	Intervalos iguais	H	Bovolo et al., 2009
Continental (Europa)	AV, SEC, SIS, TE, CH, IF, DZ, TM, TSU, EV, TE, TEC	Baixo (2-4), médio (5-7) e alto (8-10)	H, V	Schmidt -Thomé, 2006

nundações fluviais (CH); deslizamentos (DZ); sismos (SIS); erupções vulcânicas (EV); incêndios florestais (IF); secas (SEC); avalanches (AV); ciclones (CIC); erosão dos solos (ES); fluxo de detritos (FD); furações (FUR); inundações costeiras (IC); queda de blocos (QB); tempestades (TP); temperaturas extremas (TE); tempestade e maré alta (TM); *tsunamis* (TSU); ventos fortes (VF); exposição (E); perigosidade (H); risco (R); vulnerabilidade (V), Tecnológicos (TEC).

Observa também, os trabalhos elaborados em maiores escalas que envolvem uma diversidade maior de perigos e a classificação dos resultados são definidos com base em métodos estatísticos tal como o único trabalho realizado num contexto geográfico mundial desenvolvido por Dilley *et. al.* (2005) (Quadro 1.1).

Dessa forma, no setor de vertente, foi desenvolvida a análise multi-risco por Bell & Glade (2004) num contexto geográfico local, através de um modelo multiplicativo dos perigos de movimentos de massa em vertentes, a vulnerabilidade e os elementos em risco. Os resultados foram apresentados e classificados de acordo com o zonamento de áreas de riscos de perdas de vidas da Islândia, apresentados em três classes (baixa, média e alta).

Numa análise integrada dos perigos em escala regional (Varazanashvili *et al.*, 2012), o cálculo do risco total foi definido de acordo com Dilley *et al.* (2005), onde apresentaram os resultados classificados em intervalos de riscos elevados e de perdas económicas por milhões de dólares (≥ 5 , 5, 15, 45, 135, > 135).

No trabalho de Rawat *et al.* (2012), o índice de risco foi associado aos múltiplos perigos que foram definidos em três classes: baixa, moderada e alta. Os perigos foram ponderados de acordo com a distância em metros das infraestruturas e dos canais de distribuição de água (leito do rio) e de armazenamento de água. Neste trabalho, foi considerado na ponderação o regime hidrológico das nascentes de água e as variáveis foram integradas por sobreposição.

No contexto de uma montanha, Chen *et al.* (2016) calcularam os riscos de movimentos de massa em vertentes causarem danos a infraestruturas. O multi-risco foi calculado pela soma dos riscos de fluxos de detritos e de ruturas em vertentes e identificou-se os riscos nas secções das rodovias.

Numa escala de pormenor, nas vertentes e em fundo de vales, a avaliação dos perigos de movimentos massa (fluxo de detritos, deslizamentos superficiais) com o incremento das cheias foram integrados por sobreposição e, em seguida, calculado o índice de vulnerabilidade classificada em quantis (baixa, média e elevada) (Kappes *et al.*, 2012a).

No mesmo contexto de unidade espacial, Yang *et al.* (2013), num setor de fundo de vale, a partir dos parâmetros geométricos que caracterizam um barramento formado por deslizamentos, calcularam a mancha de inundação para jusante e,

posteriormente, inseriram no modelo o fluxo de vazão para montante pós rompimento do barramento. Com os resultados obtidos na modelação obtiveram a profundidade da cheia, velocidade de escoamento e variação do nível de água superficial; estas variáveis foram integradas por soma e ponderação e obtido o risco da inundação atingir a população e provocar perdas econômicas; os resultados alcançados foram apresentados em intervalos de probabilidades (p): muito baixo ($p \leq 10\%$), médio ($10 \leq p \leq 40\%$), elevado ($40 \leq p \leq 60\%$) e muito elevado ($60 \leq p \leq 80\%$).

No âmbito geográfico de um país, foi calculada a probabilidade excedente de perdas de vidas por ação de diferentes perigos naturais (Liu *et al.*, 2013). E Liu *et al.* (2016), através da análise integrada dos fatores desencadeantes de múltiplos perigos naturais calcularam a probabilidade excedente dos riscos de perdas econômicas em quatro zonas do delta do rio Yangtze.

Ainda no contexto de um país, Barua *et al.* (2016) obtiveram a exposição aos perigos naturais calculada para cada distrito com base nos dados históricos de danos potenciais e foi obtido o zonamento desses perigos; os resultados foram apresentados em três classes (baixo, moderado e alto) de intervalos iguais de 10 unidades e os perigos foram integrados pela soma. Zhou *et al.* (2015), na mesma escala de análise, utilizou a multiplicação da exposição pela vulnerabilidade ao multi-perigo no cálculo do índice de risco, apresentada em 5 intervalos de classes definidos em percentis.

Noutro enfoque temático, das mudanças climáticas, em países da Europa, Forzieri *et al.* (2016), através da integração dos múltiplos perigos pela soma obtiveram, em seguida, a exposição aos perigos associados às mudanças climáticas e os resultados foram definidos em 3 classes de percentis (moderado, forte e extremo).

No âmbito de unidade espacial de faixa costeira, a avaliação dos múltiplos perigos teve a metodologia desenvolvida em escala local e regional para 6 perigos geofísicos; foi definida a classificação inerente aos perigos de 1 a 4 (baixo, moderado, elevado e muito elevado), de forma independente, associada ao

ambiente costeiro (Appelquist & Balstrom, 2015). No mesmo contexto de unidade espacial de análise, Mukhopadhyay *et al.* (2015) realizaram a integração dos perigos naturais a partir da hierarquização dos perigos por análise multi-critério e os níveis de intensidade multi-risco foram apresentados em 4 classes (1 - baixo e 4- elevado) na região costeira.

No trabalho desenvolvido por Mahendra *et al.* (2010), a integração se deu com a soma das variáveis de elevação do nível do mar e maré de tempestade com a estimativa da futura linha de costa prevista para os 50 anos a contar da data de elaboração do estudo. O resultado foi representado pelo traçado da linha de costa (cota de 5 m) de vulnerabilidade ao multi-perigo para o cenário futuro de 50 anos.

No âmbito de outro setor costeiro, Islam *et al.* (2016) desenvolveram a avaliação da vulnerabilidade potencial a partir das variáveis geomorfologia, declive, taxa de alteração da linha de costa, taxa de subida do nível médio das águas do mar, amplitude média da maré, batimetria e altura do *storm surge*; os perigos foram integrados por soma e os resultados classificadas em intervalos definidos por quebras naturais.

Noutro âmbito geográfico, e de análise de erupção vulcânica, foi elaborada a avaliação, pela matriz de intensidade e frequência dos perigos de lavas e de fluxo de lama, de atingir o sistema de drenagem fluvial, cidades e vilas no entorno do vulcão; os resultados foram apresentados em 5 classes: negligenciável, baixo, moderado, alto e muito alto de perigos (Neri *et al.*, 2013). Esta metodologia foi utilizada inicialmente por Thierry *et al.* (2008), no contexto dos perigos de erupções vulcânicas, de movimento de vertente e de terremotos; em ambos os trabalhos os perigos foram integrados por sobreposição.

Além da integração dos perigos naturais de diversas origens acrescenta-se o trabalho de Omidvar *et al.* (2016), que avaliou a interação dos terremotos com os perigos tecnológicos (fogo e liquefação do gás) numa linha de distribuição de gás natural a uma escala de análise local. O resultado na análise multi-perigo foi

representado em classes de percentis ao longo dos 4 km de extensão de linha do gasoduto.

No ambiente dos Alpes, em planície aluvial, montanhas e fundo de vale foram identificados os riscos naturais e tecnológicos, e que englobam pessoas feridas em acidentes de trabalho no território. Os perigos foram representados por valores médios resultantes da ponderação por especialistas (método AHP) e, posteriormente, integrados por somatório do multi-risco total (Lari *et al.*, 2009).

Portanto, de acordo com a caracterização dos trabalhos supracitados observou-se que, à exceção de Appelquist & Balstrom (2015), os demais trabalhos descritos, nesse ponto, apresentaram metodologias de avaliação dos múltiplos perigos/riscos de forma integrada (Quadro 1.2).

Quadro 1.2 – Caracterização dos trabalhos de abordagem multi-perigo e dos riscos.

Contexto geográfico	Tipo de perigo	Classificação de resultados	Nível de avaliação	Autores
Local	NV, FDFDQB	Zona de riscos	R	Bell & Glade, 2004
Regional	SEC, FC, RE, NV, CH, SIS	Intervalos de riscos por milhões	R	Varazanashvili et al., 2012
Bacia hidrográfica	SEC, CH, ER, DZ.	Intervalos iguais	H, R	Rawat et al., 2012
Montanhas	FV, FD.	Riscos por sub-bacias	R	Chen et al., 2016
Vertente e fundo de vale	FD, CH, DZ.	Quantil (elevado, médio e baixo)	H, V	Kappes et al., 2012a
Fundo de vale	DZ, CH.	Prob (%)	H	Yang et al., 2013
Regional	CI, CH, SEC, SIS, DZ.	Percentis em intervalos iguais de período de retorno	R	Liu et al., 2013

Quadro 1.2 Continuação.

Contexto geográfico	Tipo de perigos	Classificação de resultados	Nível de avaliação	Autores
Regional	CH, CI, IC, DZ, VF.	Intervalos iguais de probabilidade excedente	H, R	Liu et al. (2016)
País	TD, CH, SIS, CI	Intervalos iguais	E, H	Barua et al. 2016
País	SIS, CH, SEC, SIS, NEV, GZ, RE.	Percentil	E, V	Zhou et al. 2015
Supranacional	TE, SEC, IF, CH, VF.	Período de retorno (20, 100 e 1000 anos)	E	Forzieri et al. 2016
Regional	DE, IC, IS, EC, CH.	Perigo inerente	H	Appelquist & Balstrom 2015
Regional	EC, IC, ENM, TSU, SIS.	Baixo e elevado	R	Mukhopadhyay et al. 2015
Regional	TM, ENM.	-	H	Mahendra et al. 2010
Regional	ENM, TM.	Quebras naturais	V	Islam et al. 2016
Local	EV, FD.	Frequências e impactos potenciais	H	Neri et al. 2013
Local	DZ, EV, SIS.	Frequências e impactos potenciais	E, H	Thierry et al. 2008
Local	SIS, I, AH.	Prob (%)	H	Omidvar et al. 2016
Regional	DZ, AV, CH, IF, SIS, AH.	Média regional	H, R	Lari et al. 2009

Inundações fluviais (CH); relâmpagos (RE); tornado (TD); ciclones (CI); falhas em vertentes (FV); deslizamentos (DZ); erosão (ER); erosão costeira (EC); inundações costeiras (IC); danos no ecossistema (DE); erupção vulcânica (EV); fluxo de detritos (FD); furacões (FC); incêndios florestais (IF); incêndio (I); queda de blocos (QB); neve (NV); granizo (GZ); secas (SEC); sismos (SIS); ventos fortes (VF); tempestades (TP); temperaturas extremas (TE); *tsunamis* (TSU);

tempestade marítima (TM), elevação do nível do mar (ENM); intrusão salina (IS); avalanches (AV); atividades humanas (AH), exposição (E); perigosidade (H); Risco (R); probabilidade (P).

Num contexto geográfico local observa-se o nível de avaliação na perspectiva da perigosidade e com menor quantidade de tipos de perigos; em termos de classificação de resultados da perigosidade na maioria dos trabalhos, são utilizados métodos estatísticos e os riscos classificados pela intensidade e frequência (Quadro 1.2).

Em seguida, na sequência de síntese dos trabalhos consultados, buscou-se fazer a caracterização dos trabalhos que envolvem a avaliação multi-perigo na perspectiva do efeito em cascata (Quadro 1.3).

De entre os poucos trabalhos que utilizam esta abordagem, Chone *et al.* (2015), numa avaliação em escala local do multi-perigo, consideraram que os tremores de terras desencadeiam deslizamentos; numa aplicação inicial do modelo com resultado inicial do projeto INFRARISK, utilizaram os dados de PGA (*Peak Ground Acceleration*) no cálculo da probabilidade de ocorrência de deslizamentos atingir rodovias e os resultados são apresentados pela probabilidade de deslocamento do deslizamento de 30, 60, 150 cm associado a PGA.

Na mesma perspectiva do multi-perigo no mesmo projeto INFRARISK num contexto geográfico de continente Clarke & O'Brien (2016), apresentaram os resultados em curva de danos (deslizamentos), dado a intensidade do terremoto, classificada em 4 níveis de intensidade de PGA em intervalos iguais de 0,5.

Num contexto de países, Mignan (2013) considerou a interação entre os fenômenos na perspectiva do efeito em cascata através da integração dos múltiplos perigos numa matriz de intensidade de múltiplos riscos definida pelo *Monte Carlo Method* (MCM).

E no âmbito geográfico de um país, no Brasil, onde foi desenvolvido o DRIB (*Disaster Risk Index Brazil*) total, calculado pela multiplicação da exposição aos perigos pelo produto da soma da vulnerabilidade (suscetibilidade, *comping*

capacity e *adaptive capacity*) multiplicado por 0,33; a exposição aos perigos, a vulnerabilidade e DRIB total são apresentadas em classes definidas por quantis.

De acordo com a caracterização dos poucos trabalhos apresentados que envolvem o multi-perigo na perspectiva do efeito em cascata, são referentes ao contexto geográfico de escala continental, supranacional e local. As maiores diversidades de perigos naturais são apresentadas num contexto continental e há de ressaltar o predomínio de trabalhos em perigo de movimentos de vertentes, inundações fluviais e sismos nos três trabalhos supracitados e com classificações dos resultados de acordo com a probabilidade de ocorrência do fenômeno perigoso no âmbito dos perigos e probabilidade de impacto na perspectiva dos riscos.

Quadro 1.3 – Caracterização dos trabalhos de abordagem multi-perigo que abordam o efeito em cascata.

Contexto geográfico	Tipo de perigos	Classificação de resultados	Nível de avaliação	Autores
Local	SIS, DZ.	Probabilidade	H	Chone et al., 2015
Continental (Europa)	SIS, CH, DZ.	Probabilidade	H	Clarke & O'Brien, 2016
Supranacional	SIS, DZ, EV, TSU, IF, AH, CH, IC.	Probabilidade de impacto	R	Mignan, 2013

Inundações fluviais (CH); deslizamentos (DZ); sismos (SIS); erupção vulcânica (EV); *tsunami* (TSU); incêndio florestal (IF); inundações costeiras (IC); elevação do nível do mar (ENM); atividades humanas (AH).

Mediante a revisão dos trabalhos apresentados no contexto do multi-perigo e dos riscos merece destacar a importância dos bancos de dados geográficos como ponto de partida para a definição dos indicadores, dos pesos atribuídos às variáveis no processo de hierarquização, como também na obtenção da

intensidade e da magnitude dos perigos e no cálculo da probabilidade de recorrência dos fenômenos perigosos. A quantidade e qualidade desses dados são também significativos no processo de integração dos múltiplos perigos e de validação dos modelos geográficos.

Na avaliação multi-perigo e dos riscos deve-se ter atenção quanto à coerência entre as variáveis e as representações dos resultados classificados por métodos que definam os limiares de intensidades dos níveis de multi-perigo determinados, tanto nos resultados de modelos de base física como estatísticos (quantis, decil, intervalos iguais, período de retorno, etc.), associados às limitações de representações dos múltiplos perigos no território.

No processo de integração dos múltiplos perigos naturais muitas vezes são indisponíveis séries históricas de dados com períodos em comum para o cálculo da probabilidade de ocorrência dos fenômenos perigosos em sincronia temporal e espacial. Sendo assim, a suscetibilidade definida como as áreas com predisposição e potenciais de ocorrência de fenômenos perigosos torna-se a alternativa mais coerente para a integração dos perigos, nesse caso, pela ausência ou defasagem de dados para o cálculo da perigosidade.

Na análise multi-perigo, apresenta-se como desafio a elaboração de metodologias de avaliação dos múltiplos perigos, e destaca-se, nesse contexto, os modelos estatísticos, a ponderação das variáveis em análises multi-critério, e a modelagem dos fenômenos físicos naturais assim como o desenvolvimento de ferramentas que proporcionam a avaliação independente ou integrada do multi-perigo e dos riscos no território.

No entanto, a integração entre os múltiplos perigos nem sempre é coerente, nomeadamente os perigos de diferentes origens, por exemplo os fenômenos naturais: movimentos de massa em vertentes ou ondas de cheias provocarem acidentes de trânsito em rodovias tornam difícil a integração pela gênese dos perigos, são fenômenos de origens distintas, uns determinados pelas relações de

natureza física e o outro pela vontade humana no que se refere à condução de veículos, portanto, com dinâmicas diferentes.

A análise integrada dos múltiplos perigos na avaliação multi-perigo torna-se a forma de representação holística de atuação dos diversos fenômenos naturais perigosos que podem ser desencadeados em conjunto e a ação de um perigo intensificar a ação do outro e, assim, elucidar o entendimento da dinâmica e da severidade dos perigos e apontar a vulnerabilidade ao multi-perigo no território.

Os estudos que envolvem o multi-perigo na perspectiva do efeito em cascata, a partir da integração dos perigos por modelo de base física, ponderação dos perigos, união, soma ou multiplicação, na grande maioria não descrevem os processos de interação em corrente em que os fenômenos perigosos atuem numa relação causa e efeito.

O que se verifica é que a maioria dos estudos ainda é baseada numa perspectiva estática de comparação entre os vários fenômenos perigosos e raramente se encontram trabalhos em que cada fenômeno seja abordado numa perspectiva de “cascata”, ou seja, para além dos fatores que os condicionam. Nesse sentido, os modelos necessitam de incorporar na avaliação dos fenômenos perigosos a ação dinâmica dos fenômenos naturais, sejam, as cheias, os deslizamentos, a erosão hídrica dos solos, os fluxos de detritos, a erosão costeira que se propagam de maneira dinâmica e acumulativa levando em consideração que um perigo pode impulsionar a ação do outro fenômeno numa cascata de eventos. Sendo assim, o desafio e o objetivo principal desta tese é realizar a integração dos perigos naturais representados de forma dinâmica na perspectiva do efeito em cascata.

2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ

Nesse capítulo buscou-se fazer a caracterização geral da área de estudo pela geologia, litologia, geomorfologia, solos, clima, distribuição espacial da precipitação e ocupação do solo, como também pela socioeconomia da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

2.1. Localização da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica do rio Mundaú está situada na região Nordeste do Brasil, e abrange parte dos estados de Pernambuco e Alagoas (Figura 2.1); está localizada entre as latitudes $-08^{\circ} 41' 34''$ e $-09^{\circ} 14' 00''$ sul e as longitudes $-36^{\circ} 03'36''$ e $-36^{\circ} 37' 27''$ oeste de Greenwich e, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), está inserida na região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental; suas águas desembocam no Oceano Atlântico através do Canal de Fora do Sistema Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba (Figura 2.1).

Para a caracterização geral da bacia hidrográfica foi realizada sua delimitação de forma automática por meio do uso de ferramentas computacionais em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que teve como dados de entrada o Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM - *Suttle Radar Topography Mission* (Farr *et al.*, 2007) com resolução espacial de 30 metros. Inicialmente, foram feitas as correções das células sem valor (*no data*) e das células dos talwegues no MDE a partir de uma função de preenchimento (*Fill*) e, posteriormente, foram gerados os mapas de direção de fluxos, fluxos acumulados e da rede de drenagem.

Com a localização da foz da bacia hidrográfica, a informação anterior possibilitou a delimitação e o cálculo da área da bacia hidrográfica do rio Mundaú. Assim, esta corresponde a uma superfície de aproximadamente 4103 km^2 , da qual 47,3 % está incluída no estado de Alagoas e 52,7 % no de Pernambuco (PDRH, 1999).

Na bacia hidrográfica destacam-se os cursos d'água seguintes (Figura 2.2; Quadro 2.1): o rio Canhoto, a montante (no município de São José da Laje, estado de Alagoas, recebe o nome de Canhotinho), e o rio Mundaú, a jusante, juntos possuem 228,5 km de extensão; no setor central da bacia hidrográfica, o rio Inhumas escoa suas águas para o rio Canhoto e o Mundauzinho direciona suas águas para o curso principal do rio Mundaú; e no setor jusante da bacia hidrográfica, os rios Tamoataí e Satuba drenam suas águas para o setor de planície fluvial, a alguns quilômetros a montante da região da foz do rio, onde segue direto para a Laguna Mundaú.

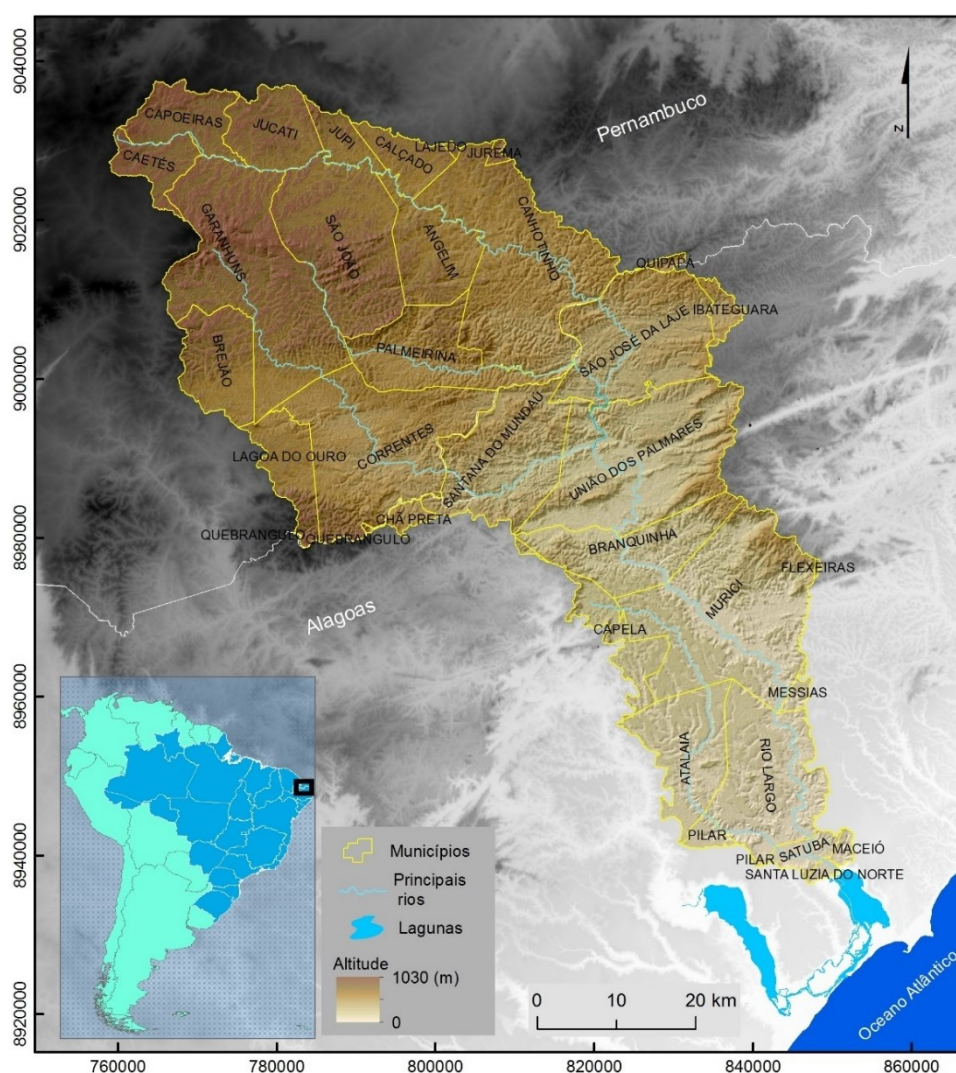


Figura 2.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Mundaú na América do Sul e na região nordeste do Brasil, nos estados de Pernambuco e Alagoas.

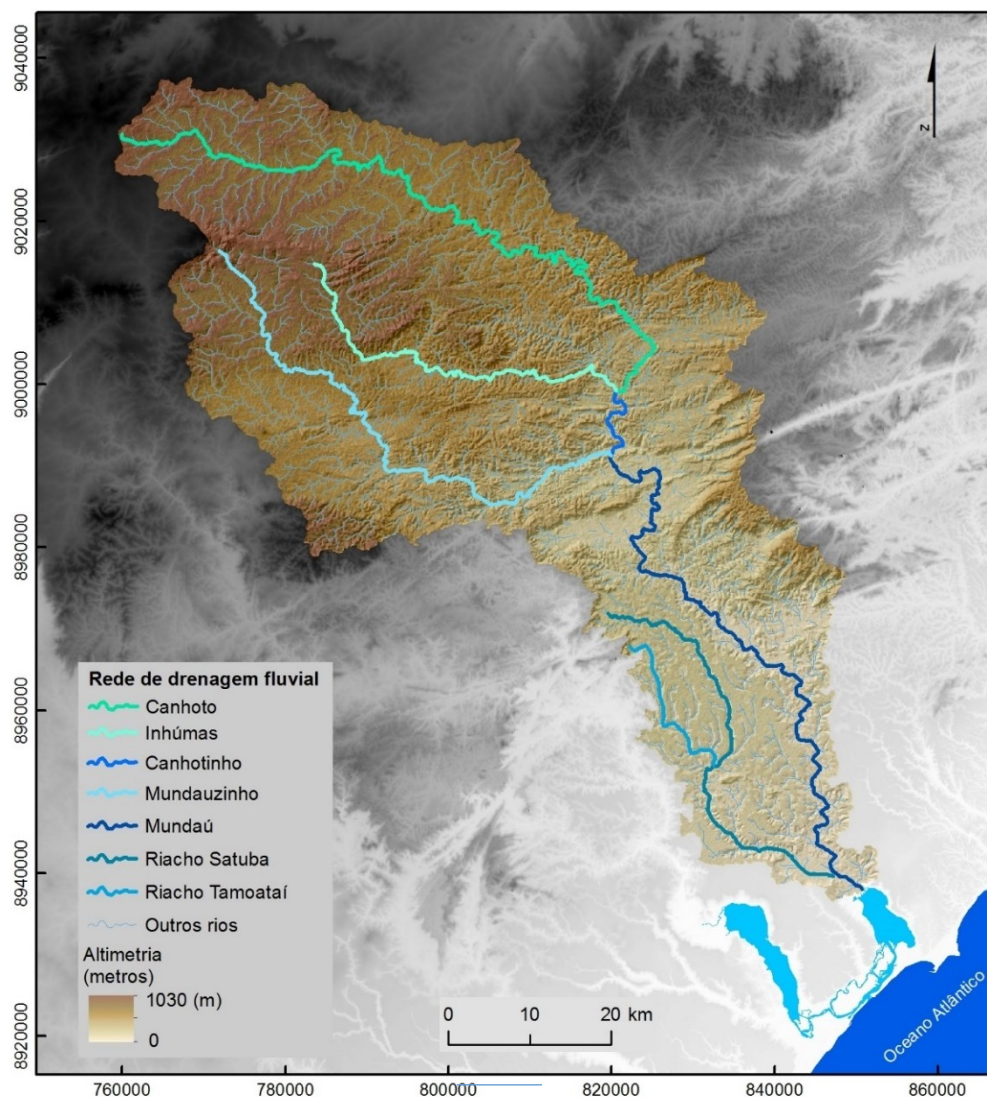


Figura 2.2 – Hidrografia e altitude da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Fonte: SRTM – *Suttle Radar Topography Mission*.

Quadro 2.1 – Comprimento dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Cursos d'água	Extensão (km)
Canhoto	118
Inhumas	59,7
Canhotinho	13
Mundauzinho	85,8
Mundaú	97,5
Riacho Satuba	59,6
Riacho Tamoataí	23,8
Outros rios	2589, 7
Total	3047,3

2.2 Estrutura geológica e litologia

Nesse ponto, é realizada a descrição das unidades geológicas na bacia hidrográfica que teve como base os arquivos vetoriais do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) ([http://http://geosgb.cprm.gov.br/](http://geosgb.cprm.gov.br/)) na escala 1/ 250 000, com informação geológica dos estados de Alagoas e de Pernambuco. Para tanto, foram realizados agrupamentos das classes geológicas, recortes espaciais da área da bacia hidrográfica e, posteriormente, a realização dos cálculos de áreas em porcentagens das classes (Figura 2.3 e Quadro 2.2), através de processos realizados por meio de SIG.

Assim, na bacia hidrográfica do rio Mundaú podem ser encontradas as classes geológicas seguintes, com a descrição das respectivas litologias no sentido de montante a jusante:

- Complexo Belém do São Francisco (44,5 %): anfibolito, migmatito, metadiorito, ortognaisse granodiorítico, ortognaisse tonalítico; a composição é granítica ou granodiorítica, com paleossoma anfibolítico a biotítico e neossoma de quartzo-feldspato (L1);
- Unidade Geológica Suíte intrusiva leucocrática peraluminosa (5,7 %): metagranitóide, leucogranitóides granodioríticos a graníticos, equigranulares médios a grossos, contém muscovita e biotita e/ou granada, foliados e deformados (L2);
- Complexo Cabrobó - Unidade 4 (4,4 %): quartzitos micáceos, quartzitos-feldspáticos e metarcóseos bandados com intercalações de rochas calcissilicáticas (L3);
- Complexo Cabrobó - Unidade 2 (15 %): biotita e/ou muscovita xisto gnaiss, leucognaisse, metagrauvaca, migmatito e níveis de quartzito, anfibolito e mármore (L4);

- Complexo Cabrobó - Unidade 3 (0,3 %): corresponde às cianita-granada metagrauvaca turbidítica (L5);
- Granito indiscriminados (4,6 %): metagranitóides, ortognaisses e migmatíticos de composição monzogranítica, granodiorítica, quartzo-monzonítica, tonalítica e possuem enclaves máficos e xenólitos (L6);
- Suíte intrusiva Itaporanga - Plúton Sem Denominação (4 %): granito e granodiorito grosso a porfirítico associado a diorito e a fases intermediárias de mistura, com ou sem epídoto magmático, calcialcalinos formado de rochas maciças (L7);
- Suíte intrusiva Itaporanga Plúton correntes (1,4 %): granito e granodiorito, grossos a porfiríticos, com ou sem epídoto magmático, associados a diorito e fases intermédias de mistura, calcialcalinos que correspondem as rochas maciças (L8);
- Formação Barreiras (5,6 %): argilito arenoso, arenito conglomerático; litologicamente, é constituído de clásticos continentais, finos a grosseiros, de cores variegadas e com grau de compactação insignificante, são sedimentos inconsolidados (L9);
- Granulito Complexo Nicolau Campo Grande (12,4 %): formado por rocha granulítica, kinzigito, paragnaisse que faz parte da formação (L10);
- Formação Muribeca - Membro Carmópolis (1,3 %): conglomerados cinzentos e castanhos, com seixos e matacões de rochas graníticas em matriz arcoseana e arcóseo com eventuais intercalações de folhelhos (L11);
- Depósitos flúvio-lagunares (0,8 %): depósito de areia e rocha pelítica (L12).

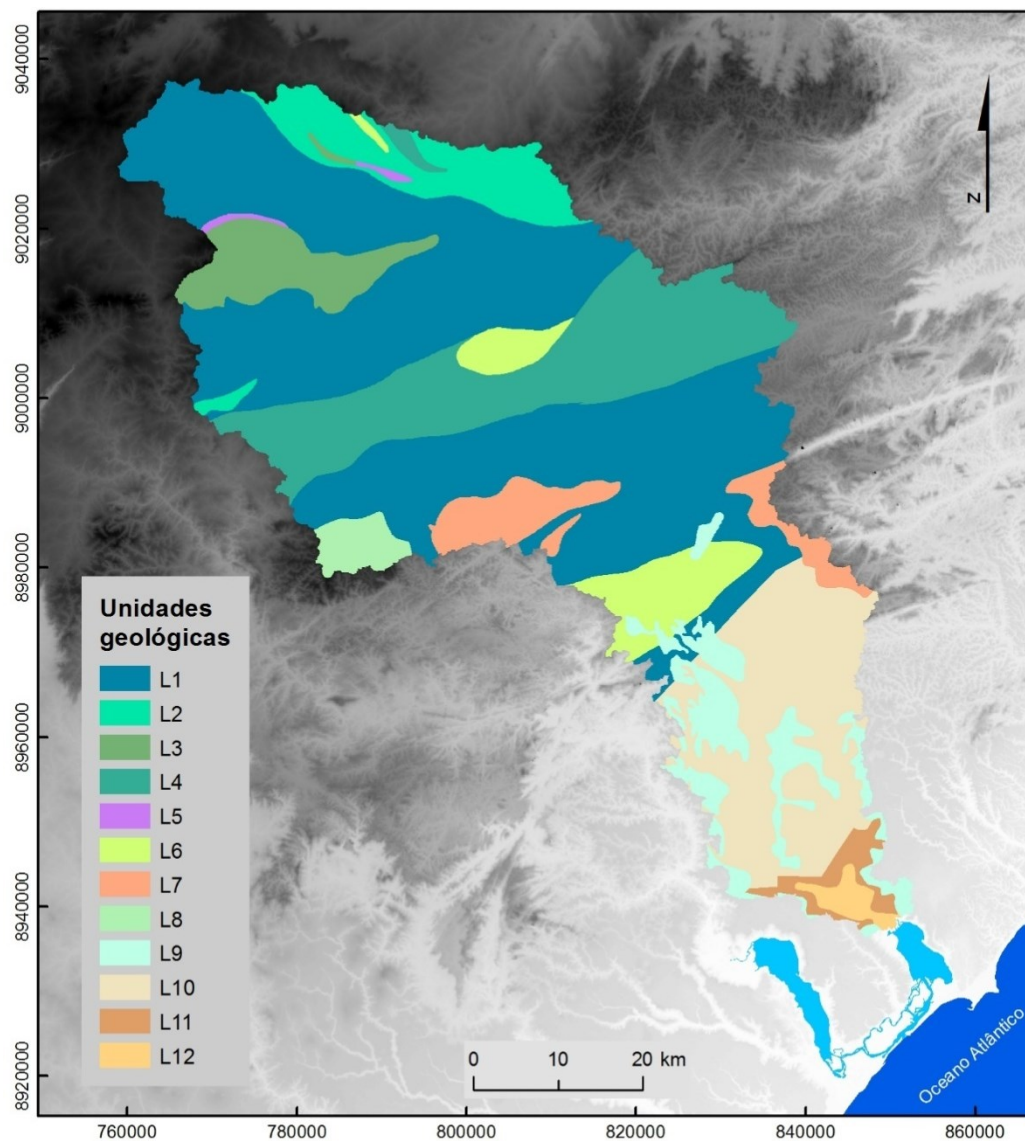


Figura 2.3 – Unidades geológicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú (para significado das siglas, ver Quadro 2.2 e descrição no texto).

Portanto, o maior predomínio na bacia hidrográfica é representado pelo Complexo Belém do São Francisco (L1), com predominância dos migmatitos (Figura 2.3; Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Frequência das classes de geologia na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Unidade Geológica	Área	
		km ²	%
L1	Belém do São Francisco	1826	44,5
L2	Suite intrusiva leucocrática peraluminosa	234	5,7
L3	Complexo Cabrobó - Unidade 4	180	4,4
L4	Complexo Cabrobó - Unidade 2	615	15,0
L5	Complexo Cabrobó - Unidade 3	12	0,3
L6	Granitóides indiscriminados	190	4,6
L7	Suíte intrusiva Itaporanga - Plúton Sem Denominação	165	4,0
L8	Suíte intrusiva Itaporanga - Plúton Correntes	58	1,4
L9	Barreiras	228	5,6
L10	Granulito- Complexo Nicolau - Campo Grande	508	12,4
L11	Formação Muribeca - Membro Carmópolis	53	1,3
L12	Depósitos flúvio-lagunares	34	0,8

No contexto da litologia, na bacia hidrográfica do rio Mundaú predominam as unidades litológicas do Complexo Migmatítico-Granitóide, as quais se alinham estruturalmente nas direções NE e ENE.

No estado de Pernambuco, no alto curso do rio Mundaú, apenas uma falha transcorrente levógira ocorre a norte de Angelim, que se estende na direção NE: é a Falha do Rio da Chata. O estilo tectono-estrutural dominante é o de deformações rupturais, com falhamentos transcorrentes sinistral que se desenvolvem segundo direções próximas a E-W, no setor intermédio da bacia hidrográfica, paralelas ao Lineamento Pernambuco, com presença da zona de cisalhamento transcorrente dextral e falhas e fraturas (Figura 2.4).

As maiores falhas ocorrem em Alagoas, a partir de União dos Palmares, as transcorrentes e dextral, e para leste e norte de Murici a zona de cisalhamento transcorrente sinistral. Uma outra estrutura marcante é o extenso falhamento de gravidade que delimita a bacia sedimentar Sergipe-Alagoas, com direção aproximadamente NE-SW. O bloco afundado foi o de sudeste, onde se

acumularam os sedimentos da bacia em questão, ao longo da Província Costeira e Continental Marginal.

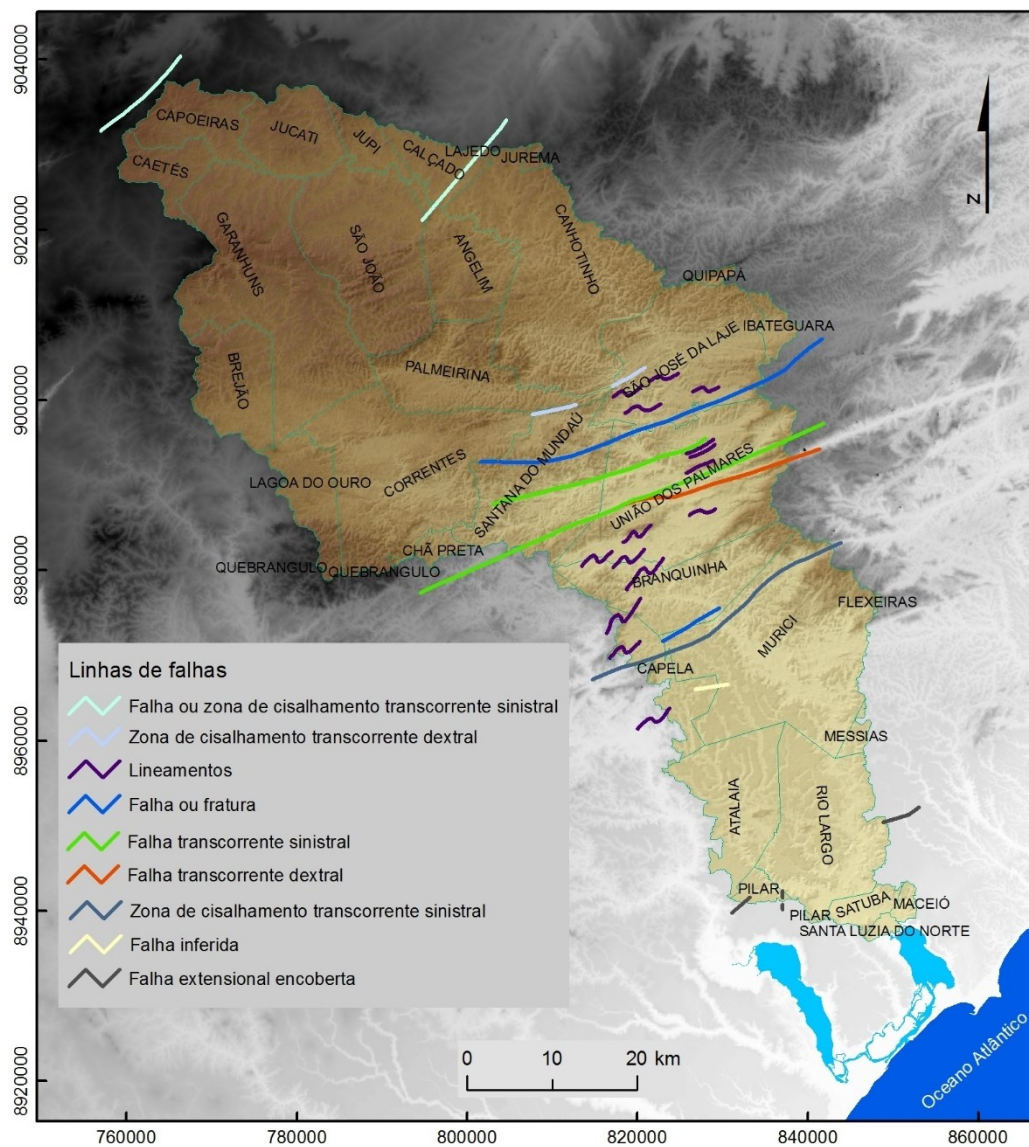


Figura 2.4 – Representação das estruturas de falhas na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

2.3 Geomorfologia

Quanto às formas do relevo da bacia hidrográfica, representou-se a morfologia do terreno pela hipsometria derivada do SRTM. Este MDE mostrou variação entre 1030 metros, na cabeceira, e 0 metros, na foz, correspondente à laguna Mundaú (Figura 2.5), com altitude média de 459,1 metros, o desvio padrão de 248,8 metros e o coeficiente de variação de 54 %.

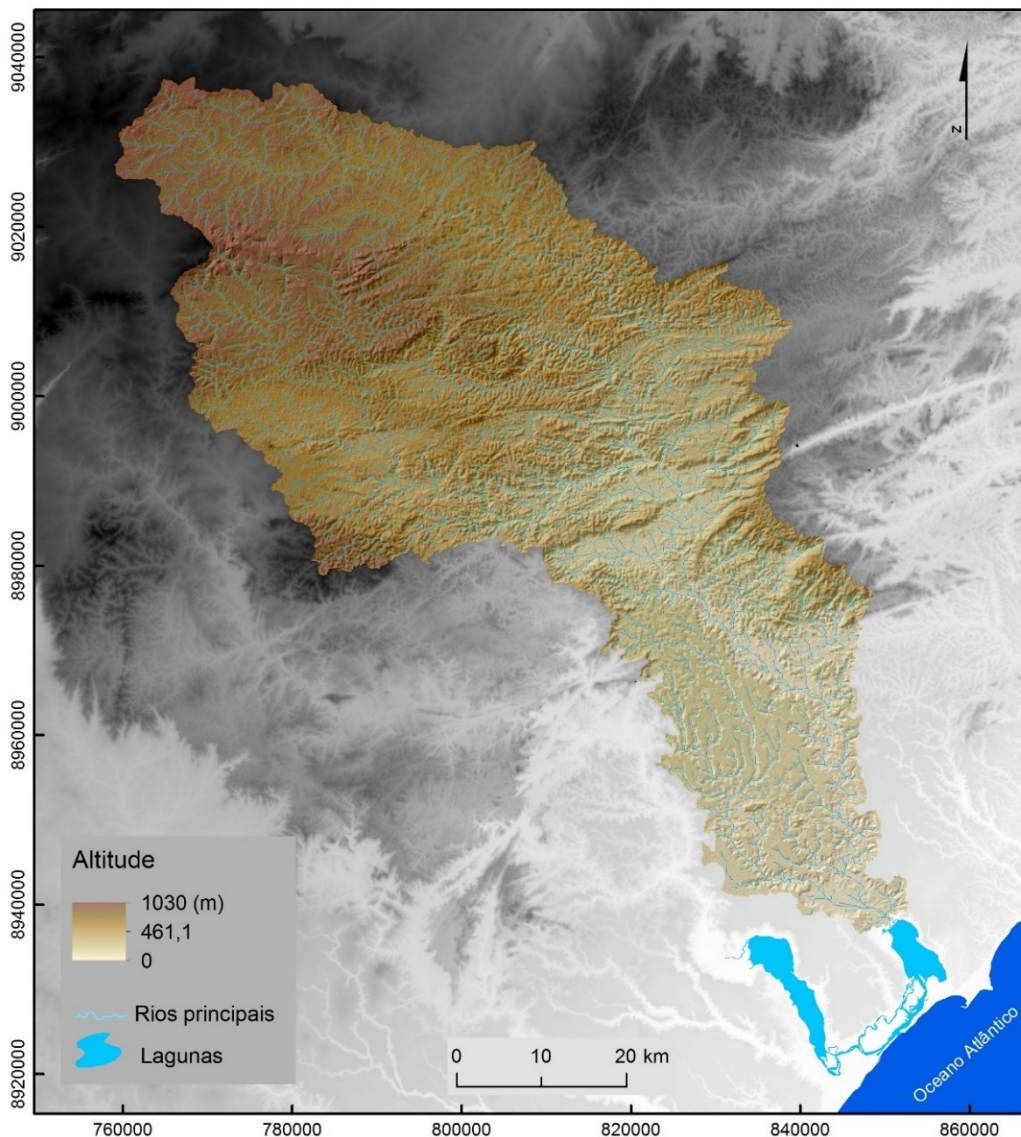


Figura 2.5 – Altitude (m) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

A partir do mesmo MDE foram realizados os processamentos e cálculos dos índices e fatores que caracterizam o relevo e informações da morfometria da bacia hidrográfica do rio Mundaú (Quadro 2.3).

Assim, a partir da altitude da bacia hidrográfica foram obtidos os indicadores de relevo como também a declividade da bacia hidrográfica. Foi calculado o índice de declive de Roche, que alcançou 4,51 m/km, e o coeficiente orográfico de Fourier com 51,36, em que valores superiores a 6 indicam relevo acentuado; o índice de Rugosidade de Melton que combina o declive e o comprimento das vertentes foi 817, para o qual os maiores valores são alcançados em bacias com relevo acidentado.

A relação do relevo de Shumm foi 7,83, sendo que quanto maior for, mais rápida é a chegada das águas no ponto de saída, o exutório; a inclinação média dos canais fluviais calculada pelo método de Horton para o canal de maior comprimento na bacia hidrográfica obteve o valor 4,31 m/km e o desnível máximo 879,5 metros.

Quadro 2.3 – Indicadores do relevo da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Relevo	Indicadores
Índice de Declive de Roche (m/km)	4,51
Coeficiente orográfico (Fourier)	51,36
Índice de Rugosidade (Melton)	817
Relação de Relevo (Schumm)	7,83
Inclinação média dos canais fluviais (Horton) m/km	4,31

Quanto à declividade da bacia hidrográfica, foi seguida a classificação da Embrapa definida por Assad (1994) e, dessa maneira, foi obtida a distribuição espacial e a frequência relativa das respectivas classes (Figura 2.6). Esta classificação mostrou a morfologia predominantemente de relevo ondulado (35,3 %), em seguida, o relevo fortemente ondulado montanhoso (26,4 %) e suave ondulado (22,4 %); a classe de relevo plano correspondeu a 12,4 %, o relevo montanhoso representou

3,5 % e o escarpado apenas 0,14 %. Portanto, constatou-se o predomínio do relevo ondulado a forte ondulado montanhoso que, somadas essas duas classes, correspondem a 61,7 % da área da bacia hidrográfica (Quadro 2.4 e Figura 2.7).

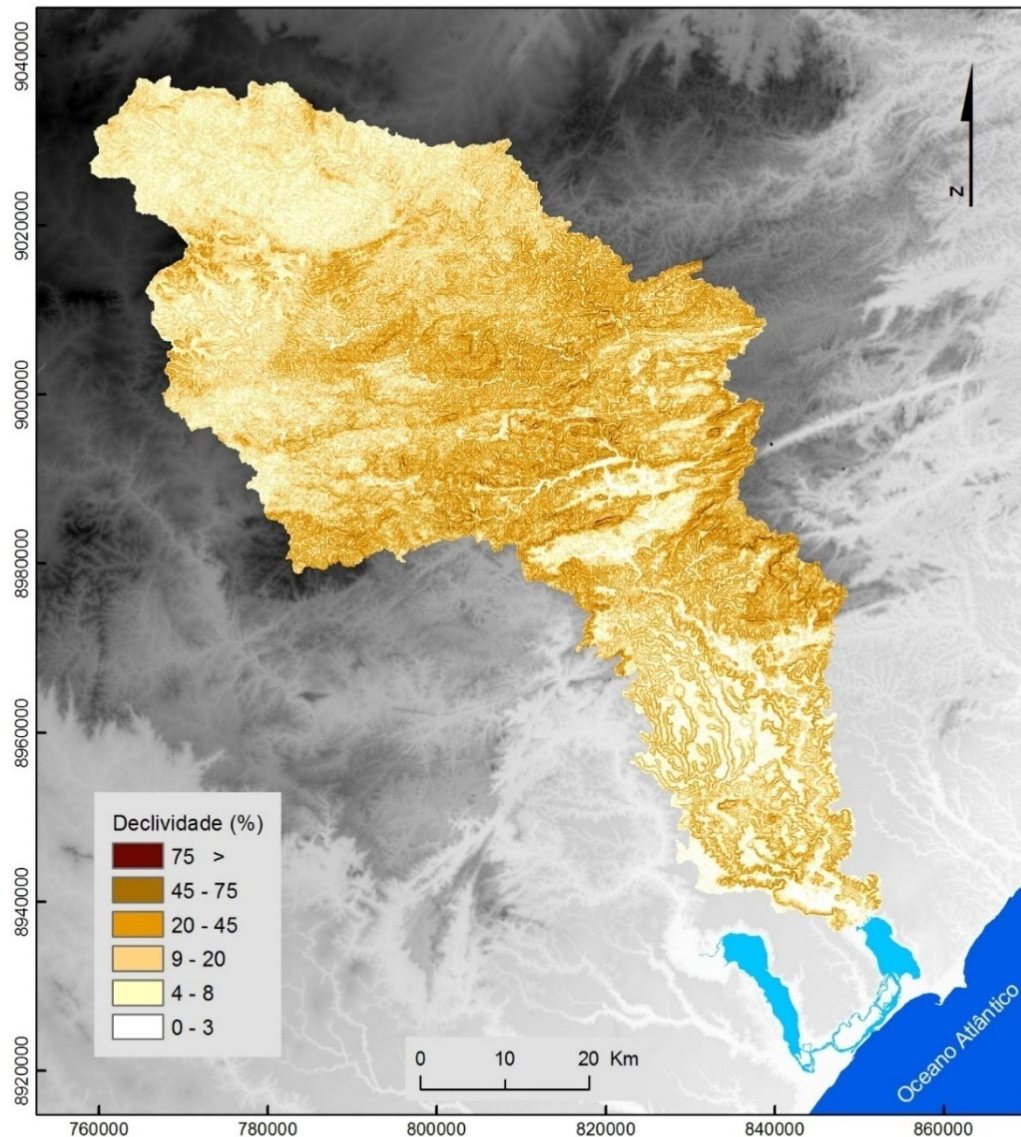


Figura 2.6 – Declividade (%) do relevo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Pelo que se observa, no setor montante o relevo é plano a suavemente plano. Há o predomínio das formas de relevo ondulado a fortemente ondulado no setor intermédio, com algumas escapas e colinas, passando a ondulado a suavemente ondulado no médio curso e, finalmente, suavemente ondulado a plano no baixo curso que corresponde a setores de tabuleiros costeiros e planícies fluviais, flúvio-

lagunares e flúvio-marinhas no setor inferior na bacia hidrográfica do rio Mundaú. (Figura 2.6).

Quadro 2.4 – Relação da classificação do relevo da bacia hidrográfica, de acordo com Assad (1994), com a declividade na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Classes (%)	Classificação	Área (km ²)
> 75	Escarpado	5,8
45 – 75	Montanhoso	141,6
20 – 45	Forte ondulado montanhoso	1081,4
8 – 20	Ondulado	1448,2
3 – 8	Suave Ondulado	918,2
0 – 3	Plano	508

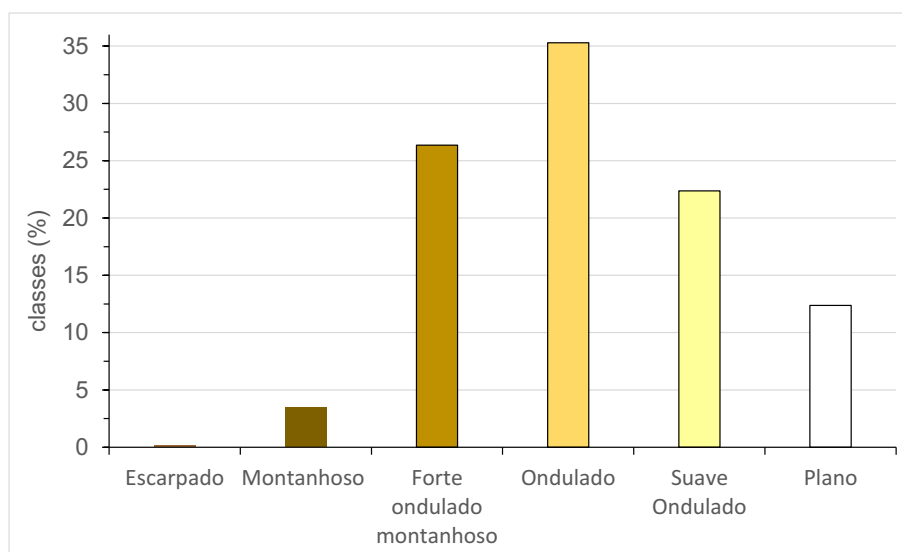


Figura 2.7 – Distribuição relativa (%) das classes de relevo.

Na sequência são descritas as características da geomorfologia da bacia hidrográfica, com base em Ferreira *et al.* (2016) e na cartografia digital, em estrutura vetorial, disponível nos Mapas da Geodiversidade Estaduais (CPRM-Serviço Geológico do Brasil). Sobre esta cartografia foi feito o recorte espacial dos estados de Alagoas e Pernambuco e a união para obtenção da cartografia da geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Mundaú, na escala 1:250 000, a partir da qual foram calculadas as áreas absolutas e relativas das 13 classes de unidades geomorfológicas.

A partir da cartografia da geomorfologia da bacia hidrográfica (Figura 2.8) foi feita a descrição das unidades geomorfológicas na ordem de montante a jusante, tal como se apresenta a seguir, e calculada a respetiva frequência (Quadro 2.5):

a) Chapadas e platôs

Compõem formas planas de ambiente sedimentar em planaltos com estrutura horizontal (Florenzano, 2016). Esta morfologia é diversificada, de relevo composto por colinas dissecadas, morros e serras de cotas mais baixas, pequenas cristas e esparsas superfícies planálticas, escarpas serranas, que bordejam o limite oeste do planalto em contato com as superfícies aplainadas da Depressão do Baixo Rio São Francisco e o vale do rio Mundaú, mais para leste. Este domínio também está associado a rochas ígneo-metamórficas da Província Borborema de idades paleoproterozoica a neoproterozoica, onde predominam rochas metamórficas de idade mesoproterozoica (anfíbolitos, quartzitos, migmatitos, paragnaisses, xistos, ortognaisses e mármore) do Complexo Belém de São Francisco e Unidade Cabrobó e plútons graníticos de idade neoproterozoica (granodioritos, granitos, monzonitos e sienogranitos) (6,9 %).

b) Planaltos

São relevos de degradação em qualquer litologia, mais elevadas do que os terrenos adjacentes, pouco dissecadas em formas tabulares ou colinas muito amplas. Sistema de drenagem principal com fraco entalhamento e deposição de planícies aluviais restritas ou em vales fechados. Predomínio de processos de pedogênese (formação de solos espessos e bem drenados, em geral, com baixa a moderada suscetibilidade à erosão). Ocorrências esporádicas, restritas a processos de erosão laminar ou linear acelerada (ravinas e voçorocas) (16,1 %).

c) Domínio de colinas dissecadas e morros baixos

Estas formações geomorfológicas representam os relevos de degradação em qualquer litologia, com colinas dissecadas, vertentes convexo-côncavas e topos arredondados ou aguçados. Possui um sistema de drenagem principal com

deposição de planícies aluviais restritas ou em vales fechados. Apresenta equilíbrio entre processos de pedogênese e morfogênese, com atuação frequente de processos de erosão laminar e ocorrência esporádica de processos de erosão linear acelerada (sulcos, ravinas e voçorocas). É frequente a geração de rampas de colúvio nas baixas vertentes (47,2 %). Essas formas colinosas, adquiridas pelo relevo, são resultantes das ações do clima úmido com chuvas bem distribuídas durante o ano, que favorece o desenvolvimento de florestas ombrófilas (Assis, *et.al.*, 2007).

d) Domínio de morros e de serra baixas

Compreende platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas (Mascarenhas *et al.*, 2005a). Os Morros e Serras Baixas, por sua vez, se constituem em morros convexo-côncavos dissecados e topos arredondados ou aguçados em cristas. Apresenta sistema de drenagem principal constituído por restritas planícies aluviais. Nesses compartimentos predominam processos de morfogênese, com formação de solos pouco espessos em terrenos declivosos, em geral, com moderada a alta suscetibilidade à erosão. Nesse domínio, é frequente a atuação de processos de erosão laminar e linear acelerada (sulcos e ravinas) e ocorrência esporádica de processos de movimentos de massa em vertentes. Nas vertentes, também é atuante a movimentação do solo do tipo rastejo (*creeping*). Ocorre, ainda, a geração de colúvios e, subordinadamente, depósitos de tálus nas baixas vertentes. Esse padrão de relevo predomina nos municípios São José da Lage e Santana do Mundaú (13,6 %).

e) Escarpas serranas

Representam um relevo de transição entre duas superfícies distintas alçadas a diferentes cotas altimétricas. Já no vale do rio Mundaú, na sua margem direita, nos municípios de União dos Palmares e Branquinha, a escarpa da Serra do Tavares

se destaca na paisagem com gradientes altimétricos que chegam a mais de 400 m (4,5 %).

f) Superfícies aplainadas conservadas

Esta unidade caracteriza-se por extensas superfícies aplainadas posicionadas invariavelmente em cotas baixas, entre 150 e 350 metros. Inserem-se, também, no contexto das grandes depressões interplanálticas do Nordeste Brasileiro. A vasta superfície aplainada desta área deprimida é constituída por dois níveis de pedimentação: o primeiro está localizado nos sopés das elevações, com os pedimentos dissecados em lombas; o segundo, em níveis de altitudes mais baixos, é formado por um plano irregular que converge para o rio São Francisco, acompanhando o sentido da drenagem (3,2 %).

g) Vales encaixados

Corresponde a uma pequena área situada a leste no interflúvio e que compreende os vales formados pelo dissecamento fluvial sobre os granitos e granodioritos coberto por sedimentos argilosos com declives de 10 a 45 graus e amplitude topográfica de 100 a 300 metros (0,01 %).

h) Leito fluvial

Ambiente de acumulação de sedimentos e trecho fluvial com afloramento de rochas graníticas, granodioríticas (0,06 %).

i) Superfícies aplainadas retocadas ou degradadas

Unidade situada no setor inferior, ao longo do interflúvio oeste, setor de substrato rochoso diversificado que sofreu um prolongado processo de arrasamento dos terrenos, gerando uma superfície aplainada retocada; compreende superfície aplainada deprimida, constituída por dois níveis de pedimentação: o primeiro está localizado nos sopés das elevações, com os pedimentos dissecados em lombas; o segundo, em níveis altimétricos mais baixos (0,46 %).

j) Tabuleiros dissecados

Formam extensos corpos sub-horizontais, com ângulos de declive para SE e voltados para o oceano, terminando abruptamente na forma de falésias mortas ou vivas, ao longo da costa. Por vezes, a dissecação dos sedimentos da Formação Barreiras faz aflorar rochas mesozóicas da Bacia Alagoas ou do embasamento pré-cambriano, impondo relevo de formas mais acidentadas (Barbosa, 1985). Os processos erosivos são do tipo laminar, linear e acelerada, onde apresentam ravinamentos e voçorocamentos. Os Tabuleiros Costeiros estão invariavelmente embasados por rochas sedimentares pouco litificadas de idade terciária do Grupo Barreiras (6,48 %).

l) Rebordo erosivo

Corresponde à unidade geomorfológica dos tabuleiros costeiros formado no período terciário. Apresentam vertentes erosivas cobertas por sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras. Esta unidade geomorfológica apresenta pouca expressividade espacial na bacia hidrográfica e precede a planície fluvial do rio Mundaú na proximidade à sua foz (0,76 %).

m) Depósitos Flúvio-Lagunares

São depósitos de sedimentos finos alojados nos vales fluviais entalhados nos sedimentos da Formação Barreiras ou entre os sedimentos marinhos arenosos dos terraços pleistocênicos e holocênicos. A unidade Depósitos Flúvio-lagunar, engloba filitos arenosos e carbonosos. Tais sedimentos foram depositados em antigas lagunas estabelecidas durante a fase final da última transgressão que, tendo cortadas as suas comunicações com o mar na regressão subsequente, foram colmatadas e evoluíram para pântanos (0,03 %) (Dantas *et al.*, 1985).

n) Planícies Flúvio-Marinhas e Flúvio-Lagunares

Ambiente de deposição com a predominância de baixos declives, de 0 a 3 graus, é constituído de sedimentos areno-argilosos. Setor com solos encharcados e com recorrência de alagamentos. Apresenta características marinhas, pois recebe

contribuição da laguna estuarina Mundaú sob influência da variação do nível da maré no setor da foz do rio Mundaú (0,8 %). Os tipos de relevo refletem as formas de acumulação e aplanamento, que é exemplificado por predomínio de sedimentos quartzoarenosos, e o terraço fluvial arenito por conglomerático e argilito arenoso (Gomes *et al.*, 2016).

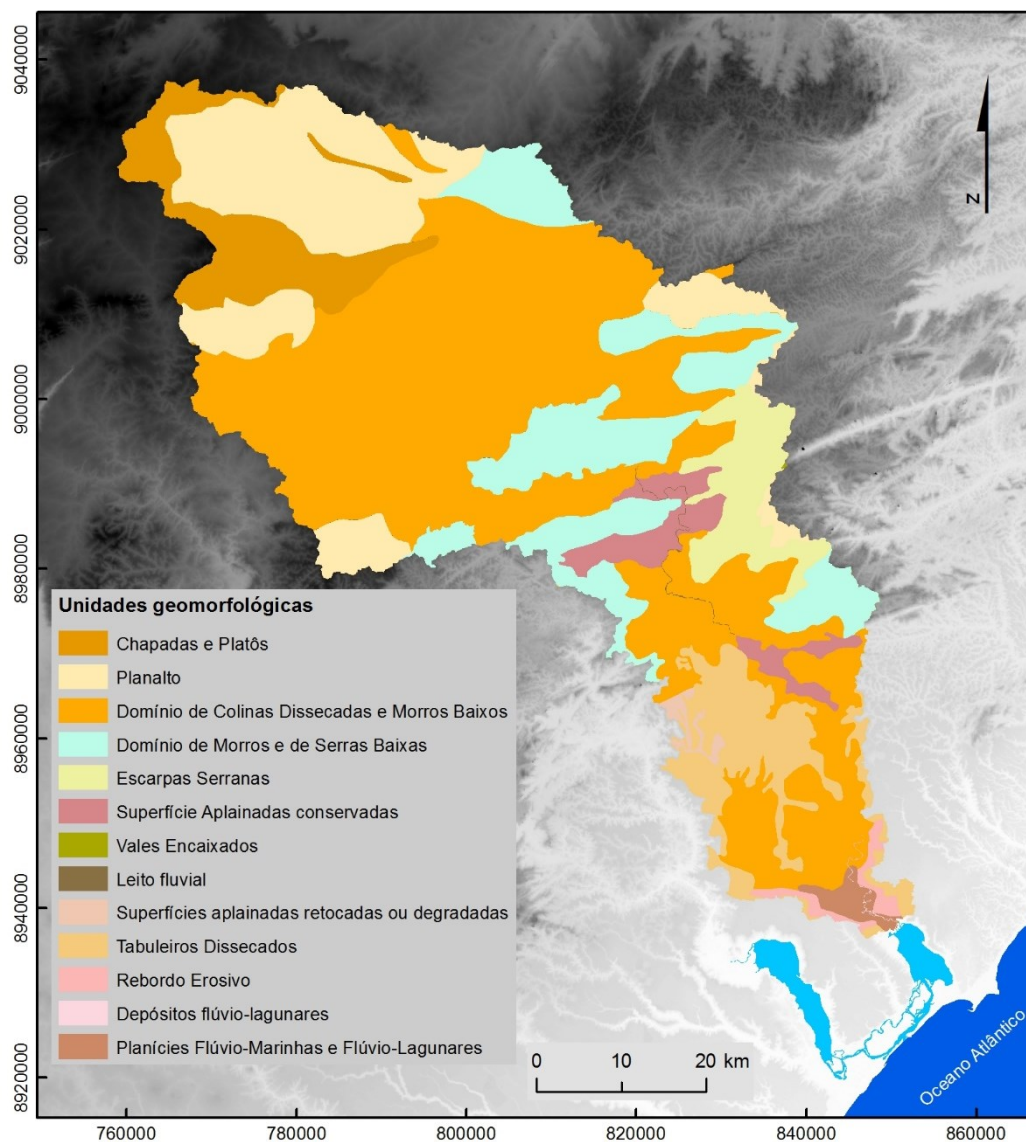


Figura 2.8 – Distribuição das Unidades Geomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú, com base em CPRM – Serviço geológico do Brasil (Torres, 2014; Villanueva, 2016).

Quadro 2.5 – Frequência das unidades geomorfológicas na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Classes geomorfológicas	Área	
		km ²	(%)
G1	Chapadas e Platôs	281,7	6,9
G2	Planalto	659,9	16,1
G3	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	1935,1	47,2
G4	Domínio de Morros e de Serras Baixas	558,7	13,6
G5	Escarpas Serranas	184,6	4,5
G6	Superfície Aplainadas conservadas	132,4	3,2
G7	Vales Encaixados	0,2	0,005
G8	Leito fluvial rochoso	2,6	0,063
G9	Superfícies aplainadas retocadas ou degradadas	18,8	0,46
G10	Tabuleiros Dissecados	265,7	6,5
G11	Rebordo Erosivo	31,0	0,76
G12	Depósitos Flúvio - lagunares	1,1	0,027
G13	Planícies Flúvio-Marinhas e Flúvio-Lagunares	31,6	0,77

2.4 Solos

A caracterização dos solos foi realizada através de consulta bibliográfica do Plano Diretor da bacia hidrográfica do rio Mundaú - PDRH (1999) e principalmente do Zoneamento Agroecológico dos estados de Pernambuco - ZAPE (Filho *et al.*, 2000) e de Alagoas – ZAAL (Marques *et al.*, 2012), ambos elaborados pela Embrapa Solos com cartografia disponível na escala 1:100 000.

Também se utilizou como apoio a esta descrição, artigos científicos e demais publicações que caracterizaram os solos dos estados de Pernambuco e de Alagoas e dos municípios que estão inseridos na bacia hidrográfica em estudo. O produto cartográfico apresentado foi elaborado a partir do recorte espacial e união

dos mapas vetoriais de solos dos estados de Pernambuco e de Alagoas e, assim, foi possível calcular as áreas e as percentagens das 15 classes (Figura 2.9 e Quadro 2.6); as nomenclaturas, as siglas dos solos e cores das legendas foram definidas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – SiBCS (Santos *et al.*, 2013). Assim, buscou-se descrever os solos de montante para jusante na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

a) Neossolos Regolíticos eutróficos (RR)

Os neossolos regolíticos eutróficos apresentam perfil de horizontes A-C, pouco desenvolvidos, arenosos (muitas vezes com cascalho ou cascalhentos), profundos a medianamente profundos, porosos, com fragipã situado comumente logo acima da rocha e que apresentam teores médios a altos de minerais primários de fácil intemperização (principalmente feldspato e potássico) nas frações areia e/ou cascalho. São solos cuja drenagem está em função da profundidade onde se encontra o fragipã e a rocha, podendo variar de moderada a excessivamente drenados (13 %).

Esses solos apresentam horizonte A com espessura variando de 10 a 35 cm e repousa sobre o horizonte C, cuja espessura varia entre 60 e 150 cm. Segundo Santos *et al.* (2012), no município Lagoa do Ouro os Neossolos regolíticos apresentam profundidade superior a 170 cm, sendo classificados como Neossolo regolítico eutrófico típico, com textura franco-arenosa, que se mantém em todo o horizonte C com o material saprolítico (Cr) a 110 cm de profundidade. No município de Caetés apresentam profundidades superiores a 210 cm, o contato com a rocha (Cr) ocorre a partir de 170 cm, e, no município de São João apresenta profundidade superior a 150 cm e o saprólito com início a 117 cm.

b) Planossolos Nátricos (SN)

Esta classe compreende solos com horizonte B textural, normalmente com argila de atividade alta, saturação com sódio entre 6 e 15 % nos horizontes B_t e/ou C, mostrando estes horizontes subsuperficiais feições associadas com umidade

(mosqueado e/ou cores de redução), em face de drenagem imperfeita e que tende a ocasionar problemas de encharcamento durante o período chuvoso e ressecamento e fendilhamento durante a época seca. Os solos são geralmente moderadamente profundos a rasos, com sequência de horizontes A-B_t-C, imperfeitamente drenados, de baixa permeabilidade e muito suscetíveis à erosão (5,6 %).

c) Latossolos Amarelos (LA)

São solos profundos e muito profundos, bem drenados, com predominância de textura argilosa e muito argilosa, raramente média. Nos tabuleiros, predominam em relevo plano e suave ondulado, mas nas áreas de morro são encontrados em relevo desde ondulado até o montanhoso. Em áreas bem definidas, têm-se a classe Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, húmicos com textura indiscriminada, relacionada à região de microclima de Garanhuns. Apresentam horizonte superficial com maior ocorrência do tipo A moderado e proeminente, mas raramente tem ocorrência do tipo húmico. São solos álicos e distróficos, com muito baixa e baixa fertilidade natural, forte a moderadamente ácidos, com variação de pH de 4,3 a 5,5 (22,5 %).

d) Argissolos Amarelos (PA)

No setor superior montante os Argissolos amarelos são solos eutróficos e distróficos, com argila de atividade baixa, rasos e pouco profundos, com horizonte A fraco ou moderado, textura variando de arenosa/média com cascalho e cascalhenta até arenosa e média/média e argilosa com cascalho e cascalhenta, com e sem fase de pedregosidade. No setor jusante, os Argissolos Amarelos apresentam-se com horizonte de acumulação de argila, B textural (B_t), tipicamente de coloração amarelada. Geralmente, com amplo predomínio do óxido de ferro goethita. Apresentam textura variando de arenosa/média até média/muito argilosa, com o horizonte superficial A do tipo moderado e proeminente. São solos com muito baixa a baixa fertilidade natural, forte a moderadamente ácidos e que podem apresentar horizontes coesos, que ao serem umedecidos, tornam-se friáveis; são

solos com restrições de drenagem, apresentam mosqueados e concreções ferruginosas nos horizontes subsuperficiais, principalmente nos solos que ocorrem próximos às bordas dos Tabuleiros Costeiro (22,3 %).

e) Argissolos Vermelhos (PV)

Estes solos ocorrem em áreas de relevo suave ondulado a ondulado, onde são desenvolvidas as margas, folhelhos e calcários do Cretáceo. São profundos, bem drenados, com teores de areia fina maiores que de areia grossa, textura média com cascalho no horizonte superficial passando para textura muito argilosa no horizonte Bt que ocorre com argila de atividade alta e baixa. De forma geral são solos de média a alta fertilidade natural (Araújo Filho *et al.*, 2000) (13,8 %).

f) Neossolos Litólicos (RL)

São solos pouco desenvolvidos, rasos a muito rasos, possuindo apenas um horizonte A assente diretamente sobre a rocha. Possuem baixa capacidade de armazenamento de água, sendo assim solos com baixa permeabilidade, apresentam textura arenosa e média (9-15 % de silte e 5-13 % de argila), com cascalho a cascalhenta. Possuem espessura pequena a mediana (20- 40 cm) (0,36 %).

g) Neossolos Litólicos eutróficos (RL)

Registra-se a ocorrência de duas pequenas manchas de Solos Litólicos Eutróficos que são solos pouco desenvolvidos, rasos a muito rasos, possuindo apenas um horizonte A em contato direto com a rocha. São eutróficos, e às vezes, tendendo a distróficos (saturação de bases 43-92 %); apresentam espessura pequena a mediana (15-40 cm); possuem horizonte A do tipo moderado; e apresentam textura média (16-42 % de silte e 12-22 % de argila), com cascalho em pequena a média quantidade (6-19 %) e abrange 0,42 % da área de estudo.

h) Planossolos Háplicos (SX)

São solos rasos cuja característica primordial é uma rápida mudança entre aspectos do horizonte A e B, de textura permeável para pouco permeável, de difícil aprofundamento. O horizonte A de textura arenosa ou média está sobre um horizonte B de textura argilosa, apresentando cores de redução e/ou mosqueado resultantes de drenagem imperfeita ou má e com estrutura em blocos subangulares e/ou angulares ou ainda, prismática. A mudança textural abrupta é de tal forma marcante que se forma, no solo seco, numa superfície dita de fraturamento entre os horizontes B e A (Silva *et al.*, 2005); compreende 0,29 % da área da bacia hidrográfica.

i) Latossolos Vermelho – Amarelos (LVA)

No limite territorial dos estados de Pernambuco e de Alagoas, no trecho da bacia com relevo plano correspondente a formação dos tabuleiros costeiros, a estruturação do solo é coesa, moderada textura argilosa. Compreendem solos minerais, muito profundos, não hidromórficos, com horizonte B latossólico, muito porosos, bastante permeáveis e bem acentuadamente drenados, com sequência de horizontes A-B-C, com transições geralmente difusas ou graduais, e sendo o horizonte B geralmente espesso; representam 0,69 % da área da bacia hidrográfica.

j) Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA)

Os Argissolos Vermelho-Amarelos são solos bem drenados, pouco profundos (às vezes rasos), apresentando horizonte A moderado com textura média argilosa cascalhenta. São solos que possuem coeficiente de infiltração moderado quando saturados e constituídos normalmente por perfis moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados (16,9 %).

l) Gleissolos Háplicos (GX)

São Solos Gley Indiscriminados, que compreendem solos hidromórficos, mal drenados, cujas características morfológicas são resultantes principalmente da

influência do excesso de umidade, permanente ou temporária, solos saturados e encharcados. São solos aluviais distróficos e eutróficos, com horizonte A fraco e moderada textura indiscriminada, fase campo e floresta perenifólia de várzea, mais solos gley indiscriminada, fase campo de várzea, ambos em fase relevo plano. Estão associados aos solos gley distróficos de textura indiscriminada mais solos orgânicos distróficos, ambos em fase campo de várzea relevo plano (2,7 %).

m) Neossolos flúvicos (RY)

No terço inferior da bacia, incluindo o vale do rio Satuba, encontra-se uma várzea de dimensão considerável, formada por Neossolos Flúvicos Distróficos e Eutróficos associados a Solos Gley Indiscriminados. Os neossolos flúvicos são pouco desenvolvidos, formados por deposições fluviais recentes, moderadamente profundos a profundos, de textura indiscriminada e drenagem comumente imperfeita ou moderada (1,12 %).

n) Áreas de acumulação (AACum)

Ambiente de acumulação de sedimentos fluviais areno-argiloso que formam ilhas ao longo do canal de drenagem (0,001 %).

o) Neossolos quartzarênicos (RQ)

Na região da foz do rio Mundaú estão presentes os neossolos quartzarênicos, são solos profundos em ambientes onde a água é removida muito rapidamente do solo. Compreende solos com textura arenosa, sem impedimentos, permanecendo sempre muito porosos e muito permeáveis (0,10 %).

p) Solos de Mangue (SM)

Os Solos indiscriminados de Mangues (SM) são solos halomórficos muito pouco desenvolvidos, lamacentos, escuros e com alto teor de sais provenientes da água do mar, formados em ambientes de mangues a partir de sedimentos flúvio-marinhas recentes misturados com detritos orgânicos, de natureza e granulometria variada, referidos ao período Holoceno. Tais sedimentos são decorrentes da

deposição pelas águas dos rios quando se encontram com as águas do mar, em condição de baixa energia. De uma maneira geral, estes solos não apresentam diferenciação de horizontes ao longo do perfil, exceto em áreas marginais, onde se verifica o desenvolvimento de um horizonte superficial com textura variável, desde argilosa até arenosa (0,03 %).

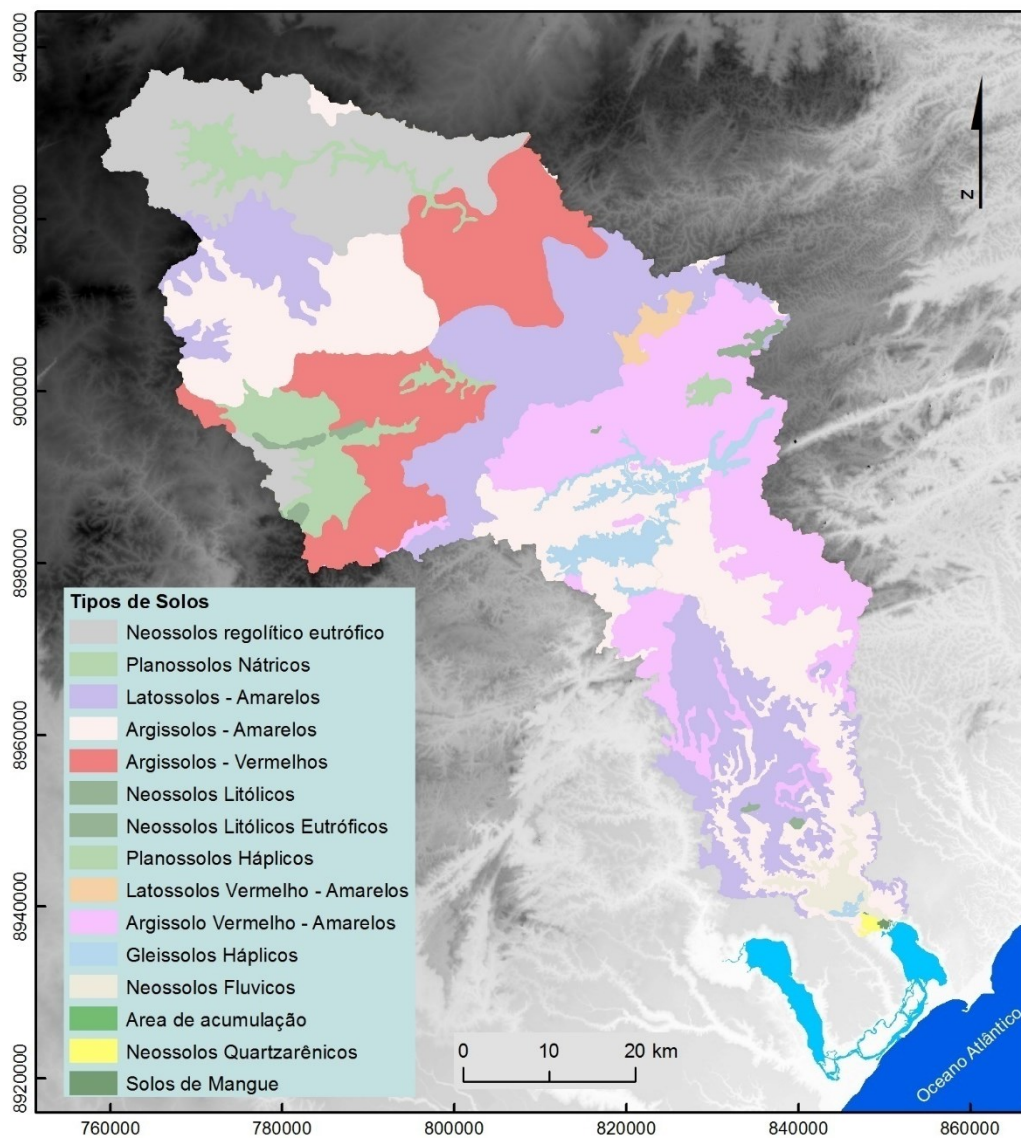


Figura 2.9 – Distribuição dos tipos de solos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Quadro 2.6 – Frequência das classes de solos na bacia hidrográfica.

Sigla	Legenda	Classes	Área	
			km ²	(%)
S1	RR	Neossolos regolíticos eutróficos	535,16	13,0
S2	SN	Planossolos Nátricos	228,15	5,56
S3	LA	Latossolos - Amarelos	924,70	22,5
S4	PA	Argissolos - Amarelos	917,52	22,3
S5	PV	Argissolos - Vermelhos	568,85	13,8
S6	RL	Neossolos Litólicos	14,91	0,36
S7	RL	Neossolos Litólico Eutróficos	17,15	0,42
S8	SX	Planossolos Háplicos	12,01	0,29
S9	LVA	Latossolos Vermelho - Amarelos	28,27	0,69
S10	PVA	Argissolo Vermelho - Amarelos	694,31	16,9
S11	GX	Gleissolos Háplicos	110,86	2,70
S12	RY	Neossolos Flúvicos	46,01	1,12
S13	AAcum	Área de acumulação	0,05	0,001
S14	RQ	Neossolos Quartzarênicos	3,91	0,10
S15	SM	Solos de Mangue	1,21	0,03

2.5 Síntese das condições físicas da bacia hidrográfica

A geologia e a litologia, as características dos solos, a geomorfologia (morfologia) são os elementos físicos naturais do terreno que implicam na predisposição dos processos perigosos de erosão hídrica dos solos, inundações fluviais e deslizamentos de terras na bacia hidrográfica. Assim, são descritos em conjunto, de montante a jusante da bacia hidrográfica, e em forma de síntese, os fatores que condicionam os processos naturais no território.

De forma geral, a bacia hidrográfica do rio Mundaú apresenta dois compartimentos geológicos/litológicos: os setores montante e intermédio, que compreendem o planalto da Borborema e que compõem os maciços cristalinos rochosos; e o setor

jusante, o compartimento sedimentar que constitui um ambiente de deposição correspondente à bacia sedimentar.

A geologia/litologia, os tipos de solos e as unidades geomorfológicas no setor montante favorecem o escoamento superficial, o transporte sedimentar e a erosão hídrica dos solos, pois correspondem a um ambiente composto por rochas cristalinas, em sua maioria granitos, granodioritos e granitos-gnaisses. De forma geral, apresentam rochas maciças cobertas por uma camada arenosa de solos pouco espessos (Planossolos, Neossolos litólicos e Neossolos Regolíticos) com baixa capacidade de infiltração da água e solos de textura argilosa (Argissolos e Latossolos) bem drenados que favorecem a circulação superficial da água; estes solos compõem as unidades geomorfológicas de Chapadas e Platôs. Estas características geológicas e de solos rasos poucos profundos favorecem o processo de erosão hídrica e propagação do escoamento superficial e de carga sedimentar para os setores intermédio e jusante da bacia hidrográfica.

No setor intermédio, apresentam também a geologia/litologia composta por rochas maciças e solos mais espessos de textura argilosa (Argissolos) nas unidades geomorfológicas das colinas dissecadas, escarpas e os domínios de serras. Neste setor predominam os declives mais acentuados que definem o relevo forte ondulado montanhoso (20 a 45°) e montanhoso (45 a 75°), que proporcionam a propagação e a acumulação do escoamento superficial e fornecem condições para a ocorrência de inundações fluviais, erosão hídrica dos solos e movimentos de massa em vertentes e escoadas.

No setor inferior (jusante) a geologia/litologia definem um ambiente sedimentar com feições geomorfológicas de colinas e tabuleiros costeiros dissecados pelo escoamento superficial em solos profundos e de textura argilosa. Neste setor, predominam os solos bem drenados que favorecem o arraste das partículas dos solos pela circulação superficial da água em superfície e a consequente erosão hídrica; quando encharcados apresentam condições para formar escoadas e movimentos de massa em vertentes; o escoamento superficial proveniente das

vertentes incrementa o transporte e deposição sedimentar nas superfícies aplanadas e nos cursos d'água.

Na borda dos tabuleiros apresenta-se a unidade geomorfológica “rebordo erosivo” com o predomínio dos Argissolos Amarelos de textura areno-argilosa, que constituem vertentes erosivas suscetíveis a movimentos de massa, quando o horizonte B é saturado e dão origem a processos de ravinamento decorrentes do escoamento superficial que intensificam o transporte de carga sólida para planície fluvial.

Por fim, no setor aplanado, a alguns quilômetros da foz do rio Mundaú, se destaca o ambiente de acumulação constituído de sedimentos arenosos e areno-argilosos, que compõem as planícies de inundação Flúvio-Marinhas e Flúvio-Lagunares. É formado por Neossolos Flúvicos de textura indiscriminada, que se apresentam encharcados pela presença do lençol freático próximo à superfície e sob influência da maré, que caracteriza um setor de forte acumulação de carga sólida e de forte predisposição para as inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

2.6 Caracterização climática: a distribuição da precipitação

2.6.1 Enquadramento climático

A bacia hidrográfica do rio Mundaú está, segundo a classificação de Koppen, compreendida nos tipos climáticos BSh (Clima Semiárido quente) e As (Clima Tropical com estação seca). O clima BSh, compreende o setor superior da bacia hidrográfica, na região do Agreste Nordeste no estado de Pernambuco, caracterizado por escassez e grande irregularidade na distribuição de chuvas. Está associado a baixa nebulosidade, com umidade relativa do ar normalmente baixa, com forte insolação e índices elevados de evaporação.

Nos setores intermédio e inferior (jusante), a bacia corresponde ao clima do tipo de As' com chuvas de outono e inverno concentradas nos meses de março a agosto. No litoral e zona da mata, corresponde a uma região úmida.

Na sequência do breve enquadramento dos tipos de clima nos setores montante e intermédio/inferior da área de estudo, buscou-se observar como se relacionam a temperatura e a precipitação e o regime dos ventos na bacia hidrográfica. Assim, buscou-se realizar a comparação da temperatura vs precipitação, a direção e a intensidade dos ventos a partir dos dados de normais climatológicas do Brasil 1961 – 1990 e 1981 – 2010 do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Ramos *et al.*, 2019; Ramos & Rebello, 2018).

Utilizou-se os dados disponíveis das normais climatológicas das estações meteorológicas, uma situada no setor montante da bacia hidrográfica, na cidade de Garanhuns, e a outra, a estação Maceió, representativa do setor jusante da bacia hidrográfica, situada no entorno do limite inferior da bacia hidrográfica (Figura 2.10 e Quadro 2.7).

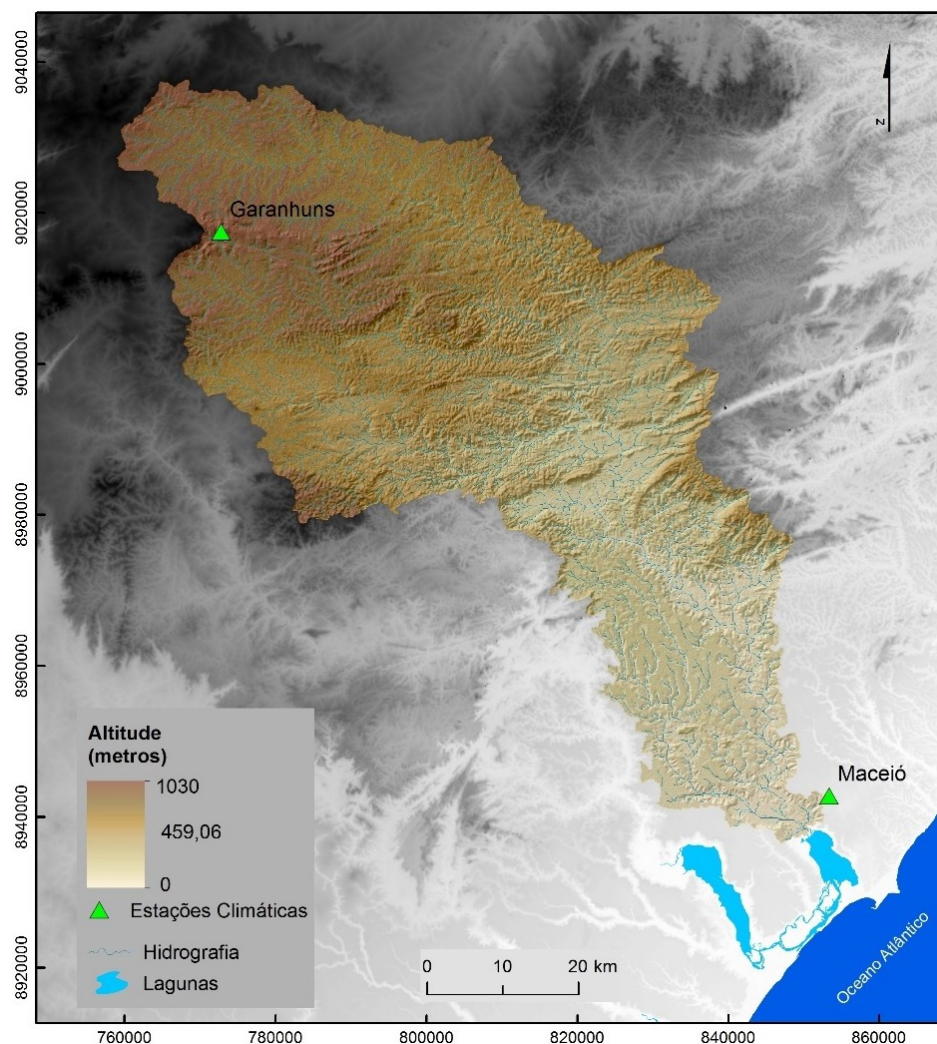


Figura 2.10 – Localização das estações climáticas na bacia hidrográfica e no entorno.

Quadro 2.7 – Características das estações climáticas na bacia hidrográfica e no entorno.

Estação	Estado	Coordenadas		Operadora	Altitude (m)
		Lat(°)	Long(°)		
GARANHUNS	PE	-8,88	-36,52	INMET	823
MACEIÓ	AL	-9,554	-35,78		64,5

As normais climatológicas (INMET) de temperatura, precipitação, intensidade e direção dos ventos utilizadas na caracterização climática são médias históricas; a precipitação se refere aos totais acumulados ao longo dos dias; a intensidade e direção dos ventos são calculadas pela média aritmética simples registrados nos três horários de observação as 12h UTC (9 horas, no horário de Brasília), o total

se refere ao acumulado do dia que corresponde a chuva das 9 horas de um dia até às 9 horas do dia subsequente.

A partir dos dados das normais climatológicas das estações Garanhuns e Maceió, procedeu-se à descrição da relação temperatura vs precipitação e, em seguida, o regime dos ventos pela intensidade e direção mensais (Quadro 2.7).

Em relação à estação Garanhuns a temperatura média anual no período de 1961 – 1990 é 20,6 °C e a precipitação anual média é 874,4 mm, no período de 1981 – 2010 a temperatura média sobe para 21,1 °C e a precipitação anual para 918,3 mm.

Observa-se que a diminuição da temperatura se reflete nos máximos mensais de precipitação no período úmido e a elevação da temperatura é coincidente com os mínimos de precipitação nos meses do período de menor precipitação (setembro a fevereiro).

Ao longo da série da normal climatológica 1981 – 2010, a temperatura eleva-se e, de forma geral, apresenta a mesma tendência da normal climatológica 1961 – 1990 (Figura 2.11), com os máximos de setembro a fevereiro e mínimos em julho e agosto.

Os máximos de precipitação no período 1961 – 1990 são de abril a julho, enquanto que no período 1981 – 2010 se estende desde março a agosto e as mínimas correspondem aos mesmos meses para os dois períodos de normais climatológicas analisados (Figura 2.11).

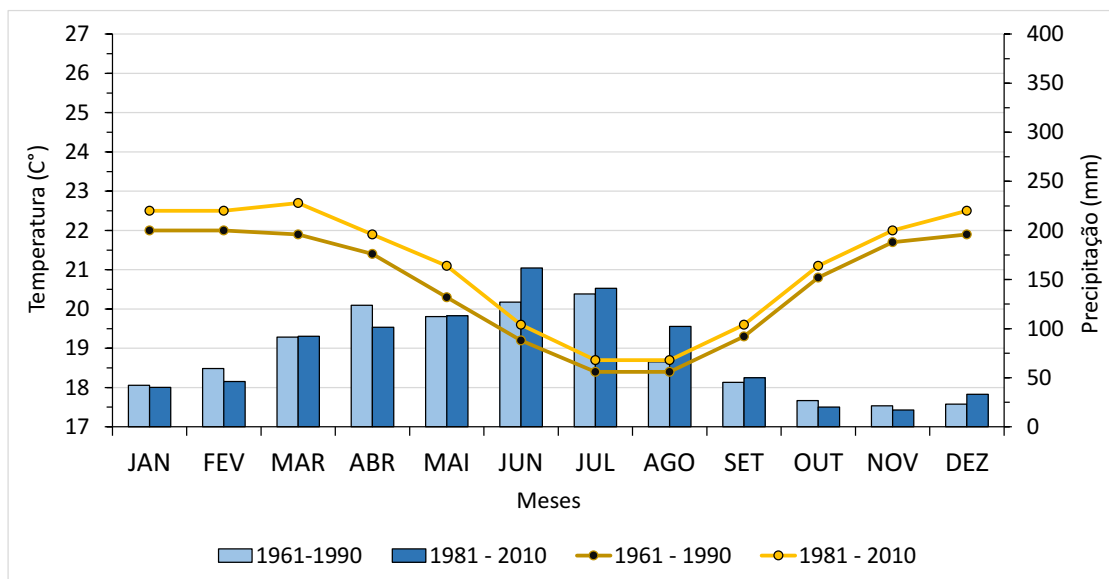


Figura 2.11 – Temperatura e precipitação mensais das normais climatológicas (1961 – 1990 e 1981 - 2010) da estação INMET Garanhuns.

Em relação a estação Maceió, conclui-se que a temperatura e a precipitação no setor jusante da bacia hidrográfica são mais elevadas do que o setor montante onde está localizada a estação Garanhuns (Figuras 2.11 e 2.12).

As normais climatológicas (1961 – 1990) da estação Maceió apresentam temperatura média de 24,8 °C e o volume total anual de precipitação de 2070,5 mm; a temperatura média no período de 1981 – 2010 é levemente maior (25,1 °C) e a precipitação decresce para 1867,4 mm em relação às normais climatológicas de 1961 a 1990.

A temperatura e precipitação, de forma geral, apresentam a mesma tendência nas duas normais climatológicas. Entretanto, a climatologia de 1981 – 2010 apresentou sensível diminuição da temperatura em relação a climatologia de 1961 – 1990.

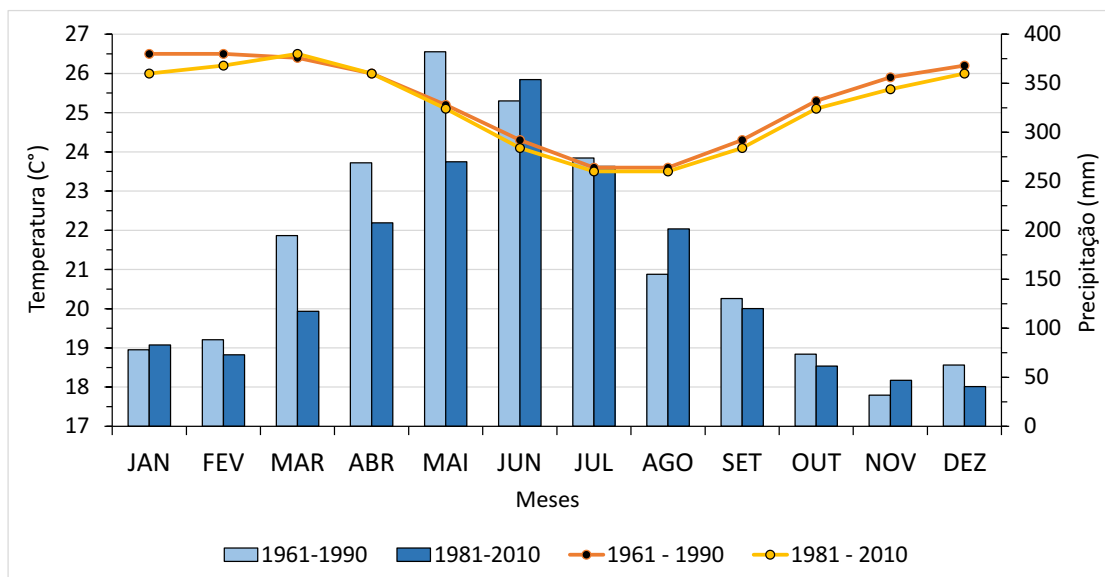


Figura 2.12 – Temperatura e precipitação mensais das normais climatológicas (1961 – 1990 e 1981 - 2010) da estação INMET Maceió.

Para a estação Maceió, o volume de precipitação das normais climatológicas apresentado no período de 1961-1990 é mais elevado nos meses de abril a julho enquanto que no período de 1981 a 2010 os máximos são apresentados nos meses de maio a agosto (Figura 2.12).

Pelo que se observa, na bacia hidrográfica do rio Mundaú, durante o período chuvoso a cobertura de nuvens é maior e, conseqüentemente, a incidência da radiação solar em superfície é amenizada pelas nuvens, fazendo com que as temperaturas médias registradas nos meses mais chuvosos sejam menores. Durante os meses menos chuvosos, são registradas as maiores temperaturas médias mensais, pois a cobertura de nuvens é menor durante esses meses e, conseqüentemente, a incidência de radiação solar em superfície é mais intensa.

A caracterização do regime dos ventos é baseada na intensidade e direção. No que se refere à direção dos ventos, definida pelos quadrantes, observa-se que os ventos de sudeste são predominantes na estação Garanhuns ao longo dos meses de janeiro a setembro, e os ventos de leste predominam desde outubro a dezembro nas normais climatológicas de 1961 - 1990. Esta tendência de direção

dos ventos de sudeste se modifica para leste no mês de outubro na climatologia de 1981 – 2010.

A intensidade mensal dos ventos decresce ao longo dos meses (climatologia de 1981 – 2010) mas permanece a mesma tendência das máximas dos ventos no período de outubro a dezembro. No entanto, a intensidade média anual dos ventos diminuiu sensivelmente de 3,75 m/s para 3,5 m/s na climatologia de 1981 – 2010 (Figura 2.13).

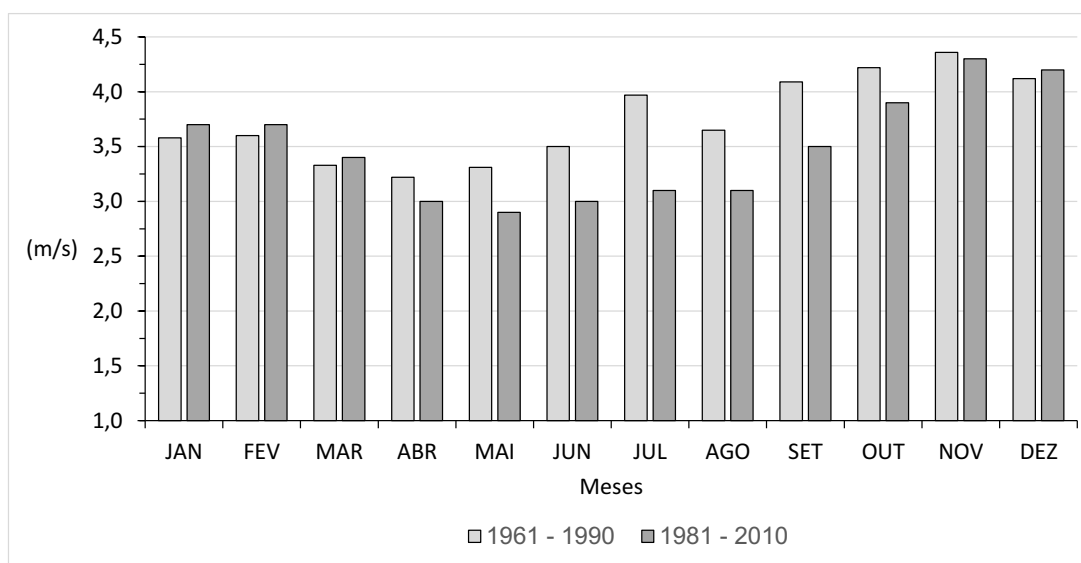


Figura 2.13 – Intensidade dos ventos mensais das normais climatológicas da estação INMET Garanhuns (1961-1990 e 1981-2010).

A jusante, na estação Maceió, situada a aproximadamente 110 km da estação Garanhuns, a intensidade média anual dos ventos de 3,69 m/s é levemente menor do que na estação Garanhuns. Observa-se que os padrões de intensidade dos ventos são menores no setor inferior da bacia hidrográfica.

Apresentou, assim como a estação Garanhuns, intensidade máxima dos ventos nos meses de outubro a dezembro e redução da intensidade dos ventos nas normais climatológicas mensais de 1981-2010, principalmente, de maio a julho (Figura 2.14).

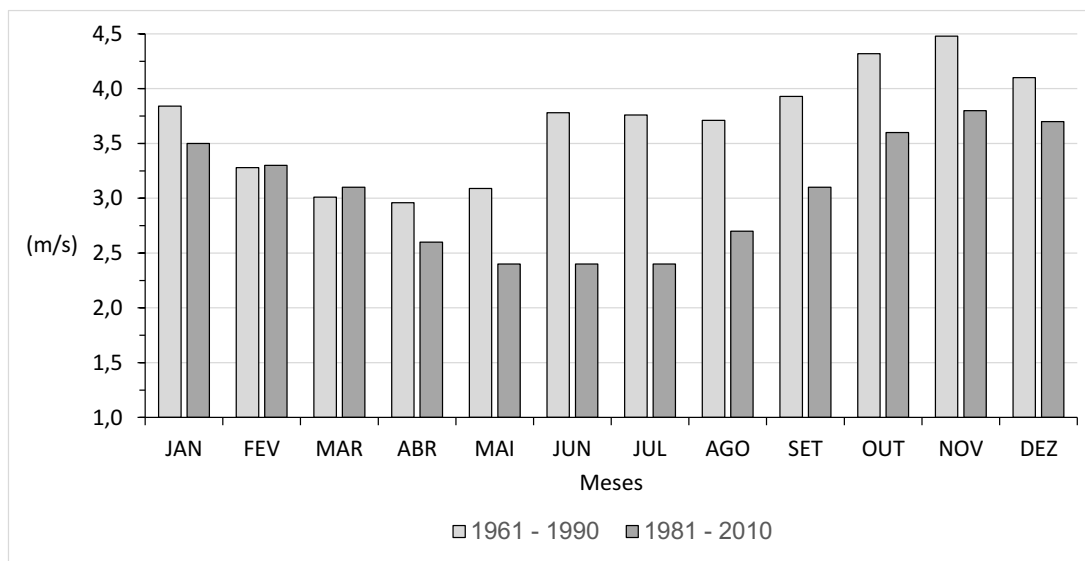


Figura 2.14 – Intensidade dos ventos mensais das normais climatológicas da estação INMET Maceió (1961 – 1990 e 1981-2010).

De acordo com a análise dos dados de intensidade dos ventos das estações Garanhuns e Maceió, constata-se que a intensidade média mensal dos ventos é sensivelmente mais elevada no setor montante em relação ao setor inferior da bacia hidrográfica.

A diferença de altitude entre as duas estações (Quadro 2.8) indica a causa dos ventos mais intensos na estação Garanhuns, mas o que se observa em ambos os setores da bacia hidrográfica é que os ventos mais intensos são os de leste, predominantes em dezembro.

Quanto aos mecanismos sinóticos que influenciam o clima na bacia hidrográfica do rio Mundaú, são os sistemas atmosféricos que atuam na costa leste do Brasil, e dão características de instabilidade ou irregularidade quanto ao regime de precipitação. Assim, esses sistemas sinóticos são: Zona de convergência intertropical, Distúrbios ondulatório ou Ondas de Lestes (OL), Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios (POAS), frentes frias, Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) e os Vórtices ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e os efeitos da circulação atmosférica de grande escala (El Niño e La Niña) (Satyamurty *et al.*, 1998; Gallego *et al.*, 2005). De entre os sistemas sinóticos supracitados, a

zona de convergência que se instala sobre a costa leste do NE do Brasil (ZCEN) constitui-se no mecanismo dinâmico mais importante para a produção de chuvas com quatro meses mais chuvosos (abril a julho). A umidade, que converge sobre o continente e alimenta a ZCEN, é proveniente do Atlântico Sul e, se as temperaturas da superfície do mar (TSM) apresentarem anomalias positivas, como geralmente ocorre nos anos chuvosos, o transporte de umidade é maior e a ZCEN é mais intensa (Molion & Bernado, 2002).

A quadra chuvosa é o período úmido anual compreendido nos meses de abril, maio, junho, julho e pode se estender até agosto. Esse período está associado à atuação dos distúrbios ondulatórios ou ondas de leste (Cohen *et al.* 1989; Ferreira *et al.*, 1990). Os distúrbios ondulatórios de leste têm sua formação na costa oeste do continente africano e se deslocam para costa leste do Brasil, nordeste brasileiro, e são responsáveis por ocasionar chuvas intensas no período de outono e inverno (Machado *et al.*, 2009). Esse sistema forma chuvas até à região do Agreste Nordestino (Rodrigues & Lacerda, 1998), que corresponde ao setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Além das Ondas de Leste (OL), que atuam na região durante o inverno, há também as Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios (POAS) que atuam principalmente de junho a agosto (Silva *et al.*, 2008). São os mecanismos de convergência dos ventos de sul relacionados com as frentes frias e os ventos de leste, que provocam as chamadas POAS (Lyra, 2018).

E no que se refere ao período seco, há a atuação das frentes frias e ou seus remanescentes no nordeste do Brasil, onde a penetração dessas frentes frias ocorre nas latitudes tropicais nos meses de novembro e janeiro (Ferreira & Mello, 2005).

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) também constituem mais um sistema sinótico que atua nessa região e são formadores de precipitação no período seco, podendo gerar precipitações com forte intensidade e curta duração na costa leste do Brasil. Segundo Souza & Alves (1998), este sistema está

associado à ocorrência de fortes chuvas isoladas. O CCM é formado por nuvens frias e pesadas do tipo Cumulonimbos que formam fortes chuvas (Maddox, 1980).

Além disso, os Vórtices ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) que se formam no Oceano Atlântico penetram na região Nordeste do Brasil, principalmente entre os meses do período seco, novembro e março, e sua trajetória normalmente é de leste para oeste (Ferreira & Mello, 2005). Destacam os autores que o VCAN ocorre com maior frequência nos meses de janeiro e fevereiro, conforme demonstrado por Gan & Kousky (1982) e o tempo de “vida” desses sistemas varia em média de 7 a 10 dias. O VCAN é o sistema formador de chuvas no Agreste que corresponde ao setor de montante da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Para além dos mecanismos formadores de precipitação em meso-escala, há as influências dos oceanos (Pacífico e Atlântico), que causam a variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o nordeste brasileiro, tanto nas escalas espacial quanto temporal, que está intimamente relacionada com as mudanças nas configurações de circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico (Molion & Bernado, 2002). O impacto causado pelo fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), é um exemplo de perturbação climática de escala global que pode ser sentido principalmente pela modificação no regime e no total de precipitação e, dependendo da intensidade do evento, pode resultar em secas severas.

No período de La Niña, caracterizado por um resfriamento atípico das águas da superfície do Oceano Pacífico, as águas superficiais anormalmente quentes do Oceano Atlântico tropical ao sul do Equador favorecem a formação de um cinturão de baixa pressão sobre a terra na região equatorial, conhecido como Zona de Convergência Intertropical. É para essa área que os ventos quentes e úmidos levam massas de nuvens, causando chuvas mais fortes do que o normal, geralmente em março e abril, no Nordeste do Brasil (Marengo, 2012), responsáveis por eventos extremos de precipitação (Dias, 2014).

2.6.2 Características dos dados pluviométricos

2.6.2.1 Distribuição espacial das estações pluviométricas

A caracterização climática descrita nesse ponto aborda como a precipitação varia na bacia hidrográfica do rio Mundaú. Dessa forma, para perceber o comportamento das variáveis climáticas como a precipitação é necessário o conhecimento da sua evolução e do seu comportamento espaço-temporal.

Os dados de base utilizados neste estudo foram de 12 estações pluviométricas distribuídas na bacia hidrográfica e no seu entorno (Figura 2.15). Esta análise da distribuição espacial e temporal da precipitação ocorre com séries históricas com período comum a todas as estações em estudo de 1963 a 1989. Com base nesse período, foram analisados os quantitativos da precipitação mensal e anual na área de estudo.

A distribuição espacial das estações pluviométricas (Figura 2.15 e Quadro 2.8) na bacia hidrográfica e área envolvente é de extrema importância para a análise espacial da precipitação na área de estudo. No setor superior, situam-se as estações Caetés, Jucati e Garanhuns, que caracterizam a pluviometria no setor de cabeceira da bacia hidrográfica. No entanto, ao longo do rio Canhoto, na margem esquerda da bacia hidrográfica, no estado de Pernambuco, e também no setor noroeste e centro-norte, há carência de dados de informação pluviométrica no período analisado.

As estações Correntes e Usina Serra Grande representam a pluviometria do setor central da bacia hidrográfica. Portanto, é a estação Usina Serra Grande que representa a pluviometria no setor do rio Canhoto e a estação Correntes no rio Mundaúzinho (Figura 2.2). Em direção a jusante, as estações União dos Palmares e Murici estão situadas ao longo do curso do rio Mundaú; já no setor inferior da bacia hidrográfica, estão as estações – Atalaia, Maceió e Rio Largo – situadas no entorno do limite inferior da bacia hidrográfica, a primeira nos interflúvios oeste, e as outras duas, a leste, na região da foz da bacia hidrográfica.

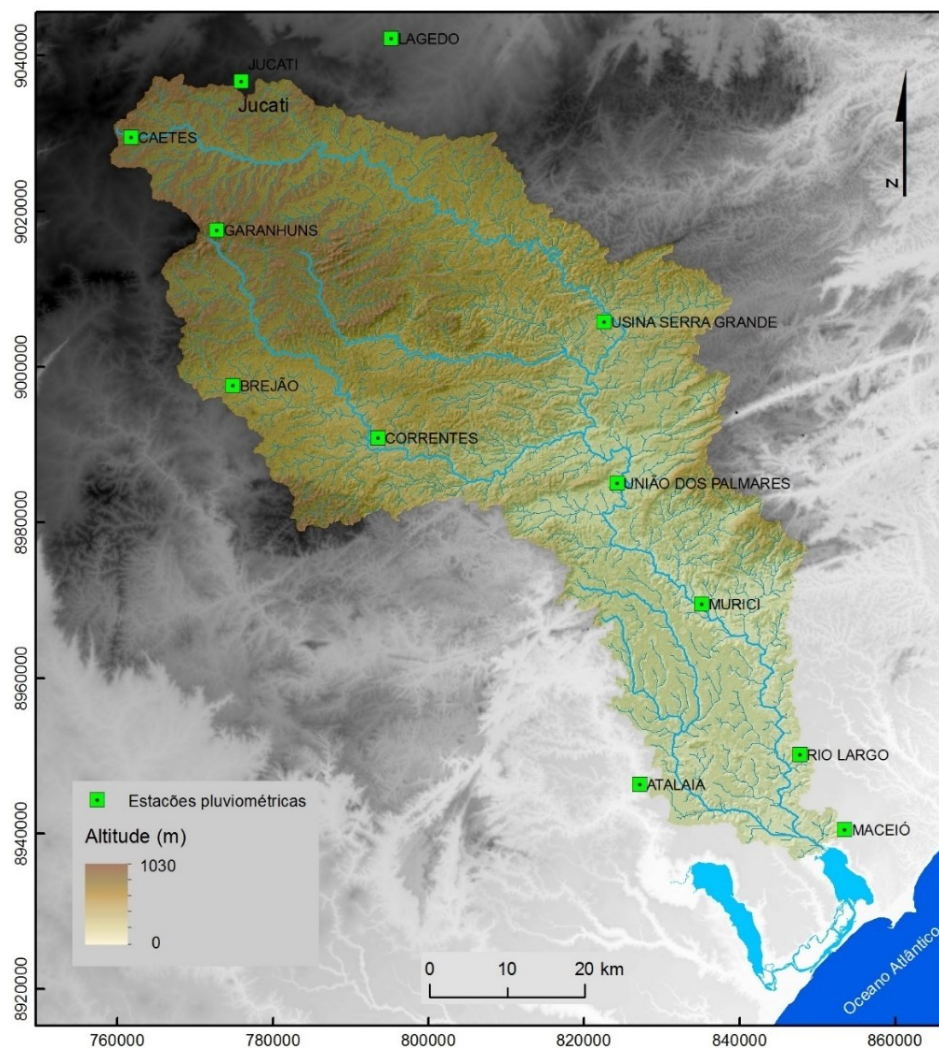


Figura 2.15 – Localização das estações pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Dessa maneira, a observação da distribuição espacial das estações permite confirmar a falta de informação pluviométrica no trecho correspondente ao Riacho Canhoto (leste), noroeste e central da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Quadro 2.8 – Características das estações pluviométricas na bacia hidrográfica e área envolvente.

Estação	Estado	Coordenadas		Operadora	Altitude (m)
		Latitude (°)	Longitude (°)		
CAETES	PE	-8,77	-36,62	IPA	828
JUCATI	PE	-8,71	-36,49	IPA	821
LAGEDO	PE	-8,66	-36,32	IPA	645
GARANHUNS	PE	-8,88	-36,52	INMET	823
BREJÃO	PE	-9,06	-36,50	SUDENE	620
CORRENTES	PE	-9,12	-36,33	ANA	391
USINA SERRA	AL	-8,98	-36,07	ANA	367
GRANDE UNIÃO DOS	AL	-9,17	-36,05	DNOCS	155
PALMARES MURICI	AL	-9,31	-35,95	CPRM	82
ATALAIA	AL	-9,52	-36,02	DNOCS	54
RIO LARGO	AL	-9,48	-35,83	DNOCS	80
MACEIÓ	AL	-9,57	-35,78	DNOCS	97

Estado: Alagoas (AL); Pernambuco (PE).

As características das estações estão descritas no Quadro 2.9 pelos parâmetros dos dados pluviométricos trabalhados (precipitação diária, mensal e anual). Algumas estações apresentam períodos longos, mas a maioria apresentou coincidência apenas no período 1963-1989 e, ainda assim, foi necessário realizar preenchimento de falhas dos dados mensais das estações. Dessa maneira, observa-se grande diferença nas séries disponíveis e, por isso, foi utilizado o período mais curto em comum entre as estações.

Quadro 2.9 – Parâmetros das estações pluviométricas utilizadas na caracterização da precipitação.

Estação	Parâmetro	Nº Valores	Data início	Data Final
LAGEDO	PA	46	1/11/1963	31/12/2007
	PM	541		
	PD	14739	1/11/1962	8/6/2007
JUCATI	PA	49	1/12/1962	31/1/2011
	PM	578		31/12/2010
	PD	16555		31/1/2011
CAETÉS	PA	37	1/1/1963	
	PM	325		
	PD	12901	1/11/1962	30/12/1989
BREJÃO	PA	27	1/1/1963	
	PM	325		
	PD	7000	1/11/1962	31/8/1982
GARANHUNS	PA	48	1/11/1963	31/2/1990
	PM	590		
	PD	10472	1/2/1990	
CORRENTES	PA	50	1/1/1937	31/12/1989
	PM	650	1/3/1934	31/8/1989
	PD	17918	2/3/1934	1/9/1989
USINA SERRA GRANDE	PA	87	1/1/1922	31/12/2008
	PM	1047		
	PD	4406		
UNIÃO DOS PALMARES	PA	73	1/1/1938	31/12/1991
	PM	882		
	PD	26419	1/7/1912	
MURICI	PA	51	1/1/1963	31/1/2014
	PM	613		
	PD	17280		
ATALAIA	PA	78	1/12/1913	31/12/1990
	PM	937		30/04/1990
	PD	28427		
RIO LARGO	PA	34	1/1/1963	30/09/1991
	PM	412		
	PD	11623		
MACEIÓ	PA	79	1/1/1913	31/12/1991
	PM	966	1/10/1912	
	PD	10171		

PA - Precipitação anual; PM - Precipitação mensal; PD - Precipitação diária.

2.6.2.2 Relação entre as séries de dados das estações pluviométricas

Com o objetivo de conhecer a associação da precipitação mensal e anual na bacia hidrográfica do rio Mundaú realizou-se o cálculo do coeficiente de determinação estação-a-estação para saber o nível de relação entre as estações pluviométricas.

Com a definição do período de anos em comum entre as estações (1963 a 1989) foi elaborada uma matriz de correlação estação-a-estação através do coeficiente de determinação (R^2), obtido dos totais anuais de precipitação a observar as relações entre as estações e servir como apoio aos ensaios de dupla acumulação de análise de consistência, fiabilidade dos dados e escolha das estações pluviométricas para caracterização anual e mensal da precipitação na bacia hidrográfica do rio Mundaú (Quadro 2.10).

De acordo com o Quadro 2.10, a maioria das estações apresentou fracas correlações entre si.

Quadro 2.10 – Coeficiente de determinação (R^2) entre as estações pluviométricas, obtido a partir das séries de precipitação anual para o período 1963 a 1989 (27 anos).

	Ca	Ju	La	Ga	Bre	Co	USG	UP	Mu	At	RL	Ma
Ca												
Ju	0,49											
La	0,27	0,56										
Ga	0,67	0,76	0,42									
Bre	0,22	0,38	0,36	0,36								
Co	0,02	0,26	0,32	0,33	0,45							
USG	0,44	0,63	0,21	0,77	0,40	0,60						
UP	0,40	0,38	0,17	0,57	0,24	0,56	0,72					
Mu	0,48	0,61	0,16	0,73	0,35	0,62	0,87	0,72				
At	0,60	0,67	0,41	0,82	0,57	0,45	0,73	0,51	0,69			
RL	0,26	0,40	0,39	0,40	0,70	0,06	0,16	0,15	0,50	0,50		
Ma	0,39	0,52	0,55	0,38	0,14	0,39	0,31	0,39	0,38	0,36	0,18	
Média	0,39	0,51	0,35	0,56	0,38	0,37	0,53	0,44	0,56	0,57	0,34	

Ca-Caetés; Ju-Jucati; La-Lagedo; Ga-Garanhuns; Bre-Brejão; Co-Correntes; USG-Usina Serra Grande; UP-União dos Palmares; Mu-Murici; At-Atalia; RL-Rio Largo; Ma-Maceió.

As estações Serra Grande, Murici e Atalaia apresentaram os maiores coeficientes de determinação médio com as restantes estações.

A estação Lagedo apresentou, em termos médios, o coeficiente de determinação mais baixo. Isto acontece, possivelmente, devido a esta estação estar situada fora da bacia hidrográfica, num setor de microclima.

O valor médio de R^2 também é baixo para a estação Rio Largo e, estranhamente, apresenta menor R^2 (0,18) com a estação Maceió, a mais próxima e na mesma margem da bacia hidrográfica.

Quanto à estação Usina Serra Grande, alcançou uma “boa” correlação com a estação Garanhuns, União dos Palmares, Murici e Atalaia (Quadros 2.10 e 2.11).

Quadro 2.11 – Maiores valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos entre os dados anuais entre as estações pluviométricas.

Estação	Estações com melhor correlação
JUCATI	Garanhuns (0,76), Usina Serra Grande (0,63), Atalaia (0,67)
CAETÉS	Jucati (0,49), Garanhuns (0,67), Atalaia (0,60)
LAGEDO	Jucati (0,56), Garanhuns (0,42), Maceió (0,55)
GARANHUNS	Jucati (0,76), Usina Serra Grande (0,77), Atalaia (0,82)
BREJÃO	Correntes (0,45), Usina Serra Grande (0,40), Rio Largo (0,70)
CORRENTES	Usina Serra Grande (0,60), União dos Palmares (0,56), Murici (0,62)
USINA SERRA GRANDE	Correntes (0,60), União dos Palmares (0,72), Murici (0,87)
UNIÃO DOS PALMARES	Garanhuns (0,57), Usina Serra Grande (0,72), Murici (0,72)
MURICI	Garanhuns (0,73), Usina Serra Grande (0,87), União dos Palmares (0,72)
RIO LARGO	Brejão (0,70), Murici e Atalaia (0,50)
ATALAIA	Garanhuns (0,82), Usina Serra Grande (0,73), Murici (0,69)
MACEIÓ	Jucati (0,52), Lagedo (0,55), União dos Palmares (0,39)

Definidas as associações estação-a-estação procedeu-se à avaliação qualitativa dos dados de precipitação perante a necessidade de avaliar a consistência das séries de dados de precipitação das estações pluviométricas; foi efetuado o tratamento estatístico por meio de ensaios de dupla acumulação. A partir dos maiores coeficientes de determinação obtidos entre as estações pluviométricas (Quadro 2.11) buscou-se realizar a análise de consistência das 12 estações por método gráfico de dupla acumulação, a fim de identificar desvios na reta e, assim, avaliar a qualidade (homogeneidade) dos dados de precipitação anual.

Nesse sentido, as alterações nos declives da reta do método de acumulação podem decorrer das mudanças nos instrumentos de medição da precipitação, nas práticas de observação, na localização das estações e no ambiente envolvente da estação, que podem levar a interpretações erradas da evolução climática (Peterson *et al.*, 1998) e também cálculos incorretos de valores de R^2 .

Quanto aos dados mensais, foram calculadas também as associações entre os dados das estações pluviométricas através de R^2 (Figura 2.15 e Quadro 2.8) comparadas estação-a-estação (Anexo 1). Estes resultados serviram de apoio ao preenchimento das lacunas mensais, realizado pelo método estatístico regressão linear simples; deste modo, as lacunas anuais foram calculadas pela soma dos 12 meses, possibilitando selecionar o período de anos em comum (1963 – 1989) para as 12 estações (Quadro 2.8).

Para tanto, são descritos no sentido de montante para jusante as principais associações obtidas pelos coeficientes de determinação (R^2) entre os dados mensais das 12 estações. Assim, calculou-se a média mensal do coeficiente de determinação (Figura 2.16) entre as 12 estações e o R^2 médio mensal estação-a-estação; os principais resultados são apresentados de forma resumida em quadros (Figuras 2.16 a 2.28 e Quadro 2.12 a Quadro 2.23).

A média das associações relativas mensais entre todas as estações em 5 meses apresenta valores baixos, com R^2 de 0,35 a 0,45, sendo o mês de janeiro o de

menor correlação e os máximos mantiveram-se no período seco, à exceção dos máximos nos meses de maio e julho no período úmido (Figura 2.16).

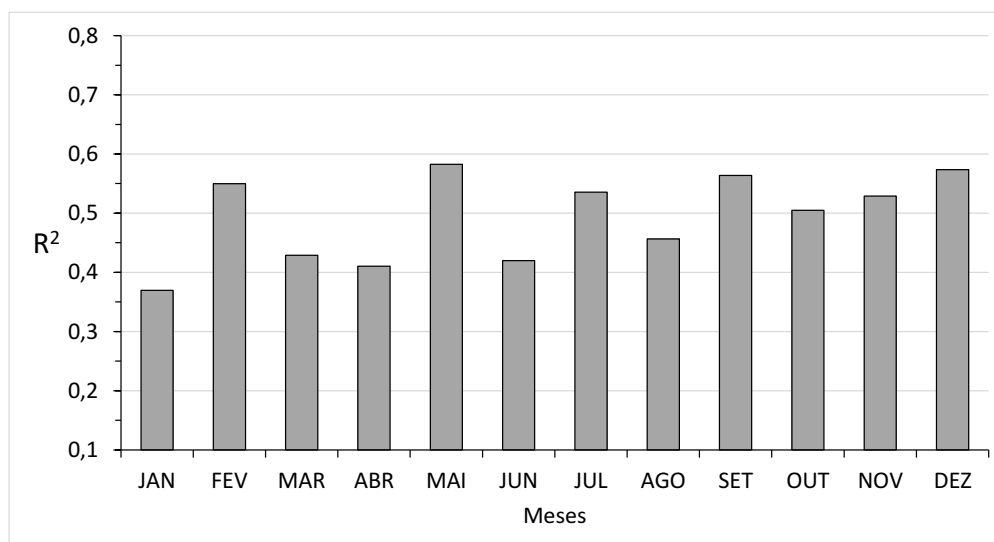


Figura 2.16 – Média do coeficiente de determinação mensal das 12 estações.

No que se refere às correlações médias mensais entre as 11 estações com a estação Caetés foram fracas, principalmente, no mês de janeiro. Na maioria dos casos foram inferiores a 0,46; os 3 valores médios mais elevados dos coeficientes de determinação foram de 0,55 a 0,6 nos meses que correspondem ao período seco e, no período úmido, apenas o mês de maio (Figura 2.17).

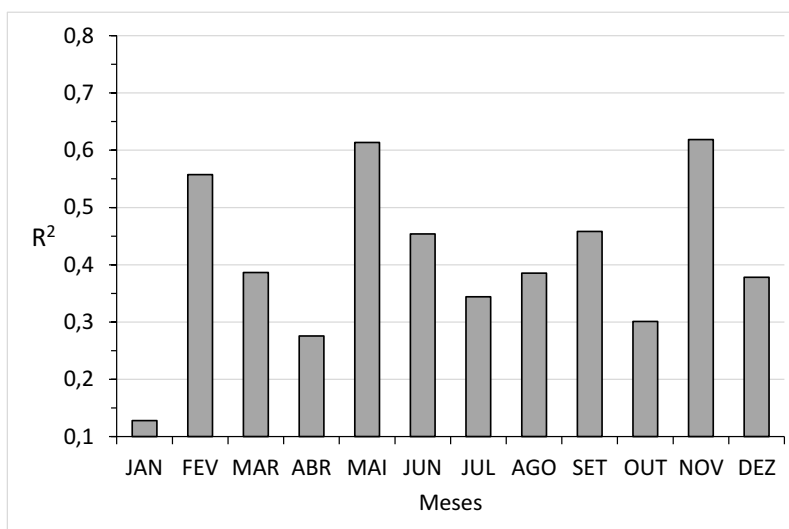


Figura 2.17 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Caetés com as 11 restantes estações.

Quadro 2.12 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Caetés.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	Ibateguara	0,52	28
Fev	Correntes	0,73	28
Mar	Lagedo	0,57	36
Abr	Jucati	0,63	38
Maio		0,63	
Jun		0,60	
Jul		0,55	
Ago	Correntes	0,49	28
Set		0,68	
Out		0,40	
Nov	Jucati	0,77	36
Dez		0,56	

Os casos com os melhores resultados de R^2 foram alcançados nos meses do período seco com a estação Jucati e, também, com a estação Correntes que está situada no setor intermédio numa altitude de 391 m e a 50 km da estação Caetés (Quadro 2.12).

A estação Jucati, situada no entorno da bacia hidrográfica, apresentou em termos médios fracos coeficientes de determinação com as 11 estações; as maiores correlações alcançadas foram de 0,50 e 0,60 e as menores abaixo de 0,35, nos meses de janeiro e fevereiro. Dentre as correlações médias, as melhores alcançadas deram-se no período úmido e no início do período seco (Figura 2.18).

De forma geral, a estação Jucati alcançou “boa” correlação com as seguintes estações: Garanhuns situada a 20 km; Brejão, situada a jusante, a 39 km de distância. Ambas as estações estão localizadas em interflúvios (Figura 2.15 e Quadro 2.13).

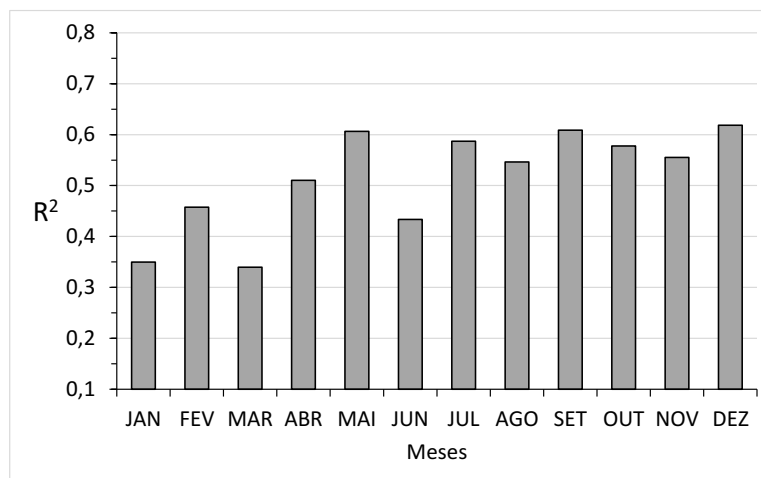


Figura 2.18 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Jucati com as 11 restantes estações..

A jusante, a estação Correntes situada a 50 km da estação Jucati alcançou em fevereiro R^2 0,64 (Tabela 6 do anexo1) e no mês de agosto o grau de associação é ainda mais elevado (Quadro 2.13).

Quadro 2.13 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Jucati.

Mês	Estação	R^2	Nº de
Jan	Garanhuns	0,73	45
Fev	Brejão	0,69	27
Mar		0,56	47
Abr	Garanhuns	0,75	
Mai		0,72	45
Jun		0,63	
Jul		0,60	
Ago	Correntes	0,86	28
Set		0,64	
Out	Garanhuns	0,68	45
Nov		0,75	
Dez	Brejão	0,83	

Os valores mostraram de forma geral que há elevada associação da precipitação nos setores montante e interflúvio oeste da bacia hidrográfica. O predomínio dos melhores coeficientes de determinação no período úmido, se deu com a estação Garanhus situada no setor montante da bacia hidrográfica (Quadro 2.13).

Situada a leste da estação Jucati e no entorno da bacia hidrográfica, a 620 m de altitude, a estação Lagedo apresentou em termos médios valores fracos de R^2 (Figura 2.19). As menores correlações estão nos primeiros seis meses e elevam-se nos seis meses restantes, à exceção do mês de outubro com R^2 de 0,45. Observa-se que no mês de maio a associação é inferior às demais estações de montante Caetés e Jucati (Quadro 2.14).

Constata-se, também, que a estação Lagedo apresentou maiores associações com a estação Garanhuns (Ipa) no mês de janeiro, março e junho (Tabela 3 do Anexo 1).

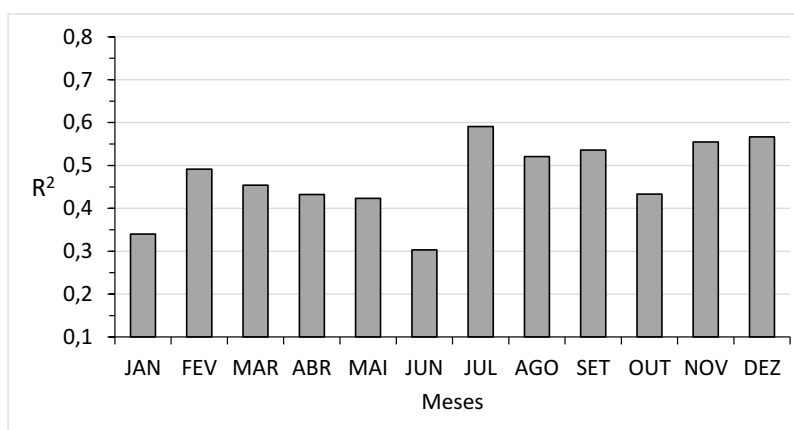


Figura 2.19 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Lagedo com as 11 restantes estações.

Nos meses do período úmido, a estação Lagedo apresentou boas correlações com as estações situadas no setor intermédio e inferior da bacia hidrográfica: Correntes, a 51 km, apresentou R^2 de 0,62 em julho e 0,68 em agosto; União dos Palmares, a 64 km, alcançou R^2 de 0,70 em julho; apresentou R^2 de 0,69 em agosto com a estação Murici, a 83 km, no setor de planície fluvial (Tabela 3 do Anexo 1).

Além disso, a estação Lagedo manteve forte associação com a estação Garanhuns (Quadro 2.14).

Quadro 2.14 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Lagedo.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	Garanhuns ITEP	0,79	20
Fev	União dos Palmares	0,74	29
Mar	Garanhuns ITEP	0,82	36
Abr	Jucati	0,75	46
Mai		0,59	18
Jun	Garanhuns ITEP	0,71	
Jul		0,73	
Ago		0,64	
Set	Jucati	0,82	44
Out		0,73	
Nov		0,88	
Dez		0,67	

Em relação a estação Garanhuns, as associações foram elevadas com as estações de jusante no período úmido. Em termos médios R^2 apresenta tendência crescente de janeiro a dezembro com máximos nos meses do período seco (fevereiro, setembro e dezembro) e, no período úmido, maio possui o R^2 mais elevado (0,76) (Figura 2.20).

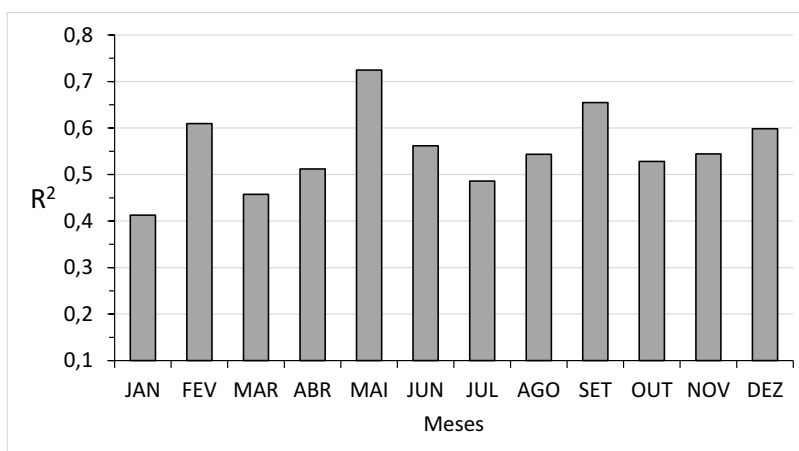


Figura 2.20 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Garanhuns com as 11 restantes estações.

A estação Garanhuns, situada a 823 m de altitude, no interflúvio das sub-bacias do rio Canhoto e Mundauzinho, mostrou, como já mencionado, associação com as estações situadas no setor montante, por exemplo: Jucati em maio ($R^2=0,76$), Caetés em abril ($R^2=0,75$) e maio ($R^2=0,72$) (Tabela 4 do Anexo 1).

No entanto, pelo que se observa, as maiores correlações mensais (Quadro 2.15) foram alcançadas com as estações do setor intermédio, principalmente com a estação Usina Serra Grande (USG), à altitude de 367 m e a 51 km de distância. Os valores de R^2 foram moderados a elevados entre as 11 estações, sobretudo em junho com a Usina Serra Grande e, no mês de maio, com a estação Murici situada no setor jusante, a 75 km, num setor de planície fluvial (Figura 2.15 e Quadro 2.15).

Quadro 2.15 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Garanhuns.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	USG	0,75	43
Fev	Correntes	0,75	27
Mar	Atalaia	0,62	29
Abr	Jucati	0,75	45
Mai	Murici	0,88	48
Jun	USG	0,85	43
Jul	União dos Palmares	0,65	21
Ago	USG	0,79	43
Set		0,78	
Out		0,71	
Nov	Brejão	0,80	40
Dez		0,87	

A jusante da estação Garanhuns, no setor intermédio, numa altitude de 620 m, a estação Brejão teve fraco coeficiente de determinação médio (0,48) com as demais estações. Há tendência crescente de R^2 de fevereiro a abril e máximos em maio, julho, novembro e dezembro (0,7). Observa-se 2 máximos no período úmido e outros dois no início do período seco (Figura 2.21).

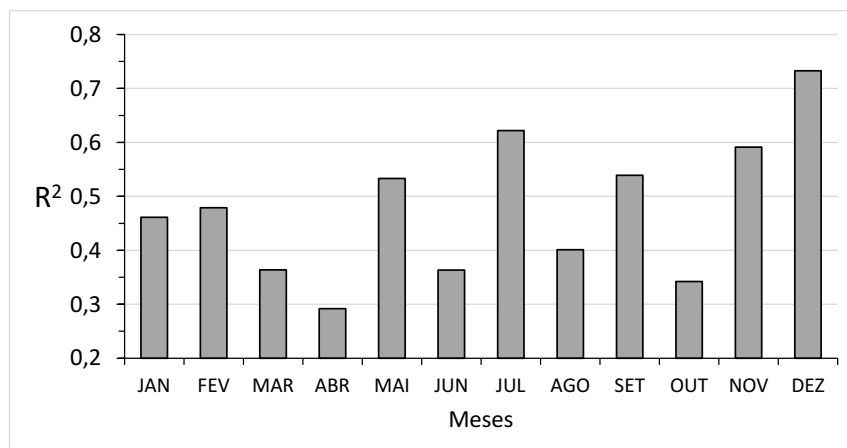


Figura 2.21 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Brejão com as 11 restantes estações.

Quanto às associações mensais, mantiveram R^2 muito elevado, de 0,98 a 1, ao longo dos meses do ano com a estação em seu entorno Brejão-Itep (Tabela 5 do Anexo 1). No que se refere ao período úmido, o grau de associação é baixo com a estação Garanhuns (Quadro 2.16). Mas no mês de julho, alcança bons resultados com as estações União dos Palmares (0,84) e Usina Serra Grande (0,75) (Tabela 5 do anexo 1).

Quadro 2.16 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Brejão.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	Usina Serra Grande	0,6	
Fev	Jucati	0,69	
Mar	Murici	0,57	
Abr	Garanhuns	0,48	
Mai	Caetés	0,63	
Jun	Garanhuns	0,46	
Jul	Correntes	0,69	
Ago	Jucati	0,58	
Set		0,77	
Out	União dos Palmares	0,78	
Nov	Jucati	0,89	
Dez	Murici	0,84	

Pelo que se observa, as associações foram elevadas no início do período úmido com a estação Correntes, situada a jusante da estação Brejão e, no início do período seco, as associações relativas mantiveram melhores resultados (Quadro 2.16).

Quanto à estação Correntes, situada numa altitude de 391 m, manteve fraca associação média (0,49) com as 11 estações. Pelo que se constata, há tendência crescente de R^2 ao longo do ano, à exceção do mês de janeiro e do mínimo em junho (Figura 2.22). Em relação ao período seco, em novembro e dezembro, as associações se mantêm mais elevadas em torno de 0,6.

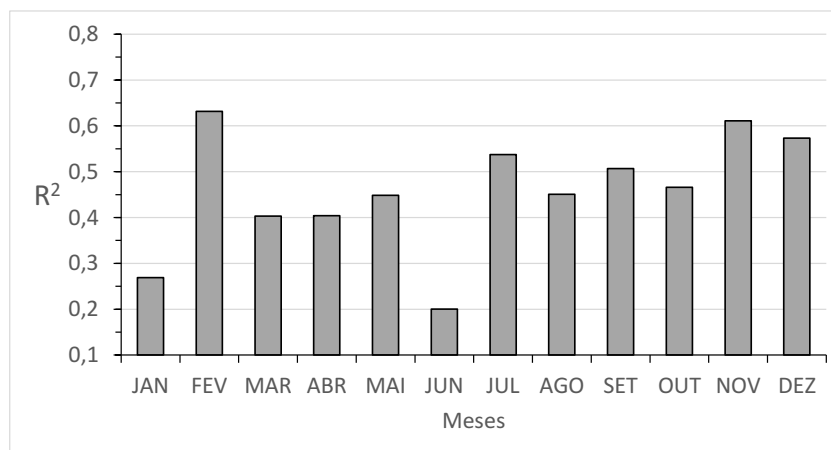


Figura 2.22 – Coeficiente de determinação mensal médio da estação Correntes com as 11 restantes estações.

As associações mensais são maiores com as estações situadas no setor de montante: Jucati, Caetés e Lagedo, em altitudes de 821, 828 e 641 m, respectivamente, e distam aproximadamente 50 km da estação Correntes.

A estação Brejão, numa altitude de 620 m e a 20 km de distância da estação Correntes, apresentou boa relação no período seco (novembro e dezembro). Nesse mesmo período, os valores de R^2 permaneceram acima de 0,7 com as estações: Caetés em fevereiro (0,73) e novembro (0,75); Lagedo (0,75) em novembro (Tabela 6 do Anexo 1).

Assim, as associações foram mais elevadas no final do período úmido (julho e agosto) e no início do período seco (setembro, outubro, novembro e dezembro) com as estações de montante (Quadro 2.17).

Quadro 2.17 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Correntes.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	União	0,47	52
Fev		0,70	52
Mar		0,57	52
Abr	Lagedo	0,60	28
Mai	Jucati	0,86	28
Jun	Murici	0,37	17
Jul	USG	0,63	55
	Murici	0,77	27
Ago	Jucati	0,86	28
Set	Caetés	0,68	28
Out	Jucati	0,66	28
Nov	Brejão	0,78	27
Dez		0,78	27

No setor intermédio a oeste, a estação Usina Serra Grande situada em planície fluvial manteve R^2 médio de 0,49 e, no início do ano ainda mais baixo, mas se eleva ao máximo em maio e setembro. De maneira geral, a tendência é crescente ao longo do ano, mas com fraca associação média (Figura 2.23).

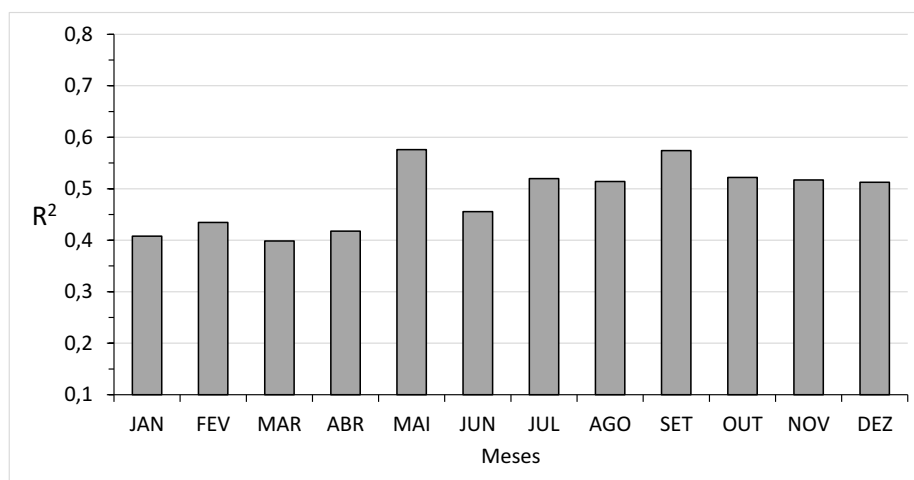


Figura 2.23 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Usina Serra Grande (USG) com as 11 restantes estações.

Quanto às associações mensais, os melhores resultados foram alcançados com a estação União dos Palmares, sobretudo no período úmido (Quadro 2.18).

Quadro 2.18 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Usina Serra Grande (USG).

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	União dos Palmares	0,66	64
Fev		0,50	
Mar		0,81	
Abr		0,73	
Mai		0,79	
Jun		0,74	
Jul		0,75	
Ago		0,67	
Set		0,60	
Out		0,85	
Nov		0,72	
Dez		0,75	

A jusante, a estação União dos Palmares apresentou o mais elevado coeficiente de R^2 (0,56) com as outras 11 estações. Os valores são “bons” com dois máximos do período úmido (maio e julho) e outros três no período seco (outubro, dezembro

e fevereiro) e os demais meses apresentaram valores de R^2 inferiores ou em volta de 0,5 (Figura 2.24).

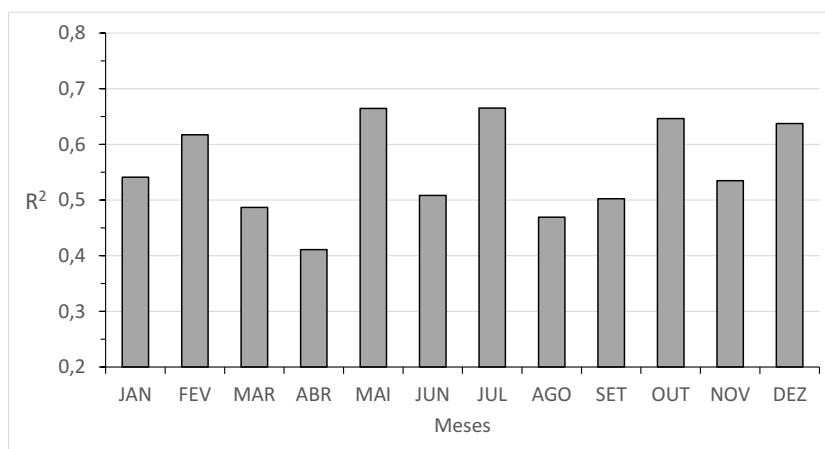


Figura 2.24 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação União dos Palmares com as 11 restantes estações.

Os valores de R^2 mostraram fortes associações com as estações a jusante, Murici e Atalaia, situadas em planície fluvial, que distam, da estação União dos Palmares, 35 e 57,5 km, respectivamente (Quadro 2.19).

Para além das estações situadas a jusante da estação União dos Palmares, as associações também foram moderadas a fortes com as estações do setor superior da bacia hidrográfica: estação Garanhuns, situada numa altitude de 842 m e a 57 km de distância alcançou $R^2 = 0,71$ em Maio, 0,72 em junho e 0,76 em novembro; a estação Jucati, situada a 828 m de altitude, que dista 76,5 km, alcançou 0,78 e 0,76 em junho e novembro, respectivamente; a estação Lagedo, situada numa altitude de 645 m e à distância de 64 km, alcançou em julho 0,71 (Tabela 8 do Anexo 1).

As associações com as estações de montante prevaleceram nos meses do período úmido (maio, junho e julho) e no período seco (novembro) (Quadro 2.19). Observa-se assim, que há forte associação da precipitação do setor intermédio e montante no período úmido de acordo com as associações relativas supracitadas.

Quadro 2.19 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação União dos Palmares.

Estação	USG	Murici	Atalaia
Jan	0,67	0,82	0,67
Fev	-	0,88	0,79
Mar	0,80	0,66	0,63
Abr	0,73	0,73	0,75
Mai	0,79	0,88	0,76
Jun	0,74	0,67	0,64
Jul	0,75	0,78	0,65
Ago	0,67	0,63	0,73
Set	0,60	0,63	0,68
Out	0,84	0,84	0,80
Nov	0,71	-	0,64
Dez	0,78	0,84	0,78
Nº valores	64	29	73

No caso da estação Murici, situada no setor inferior da bacia hidrográfica, de maneira geral, as associações médias foram boas com as 11 estações (R^2 médio de 0,57). Apresentou 6 valores médios de R^2 entre 0,6 e 0,7. O valor mais elevado ocorre no período úmido (maio e julho) e no período seco o R^2 médio é elevado em 4 meses (setembro, dezembro e fevereiro). Constatou-se também, outro conjunto de 6 meses com fracos R^2 mínimo em torno de 0,4 e 0,55 (Figura 2.25).

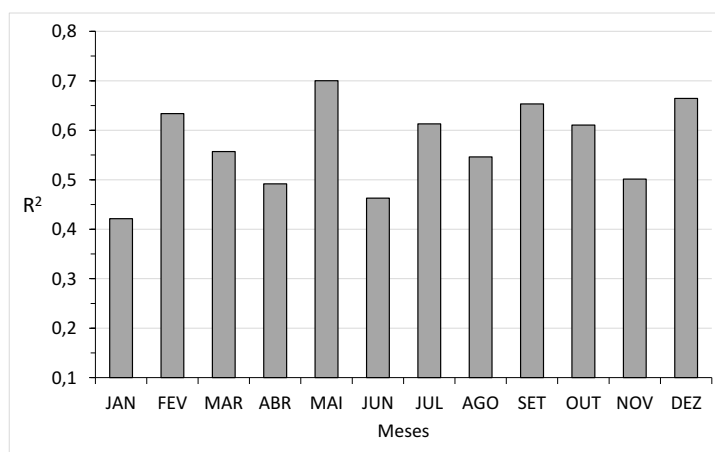


Figura 2.25 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Murici com as 11 restantes estações.

No caso das associações mensais, para além da forte relação com a estação União dos Palmares, a estação Murici mostrou fortes associações com as estações Usina Serra Grande e Atalaia. Houve também, bons resultados de R^2 no período seco com as estações de montante, Caetés e Brejão, que distam 94,8 e 62,5 km, respectivamente.

Quadro 2.20 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Murici.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	União do Palmares	0,82	29
Fev	Atalaia	0,92	30
Mar		0,90	
Abr		0,79	
Mai		0,77	
Jun		0,76	
Jul	USG	0,90	47
Ago		0,84	
Set		0,85	
Out		0,77	
Nov		0,70	
Dez	Brejão	0,86	27

O que se observa é que a estação Murici apresentou associações mais elevadas no período seco e fim do período úmido (Quadro 2.20).

Situada no setor inferior da bacia hidrográfica, junto ao limite leste, a estação Atalaia tem associação média de 0,55 com as restantes estações. Os maiores valores médios foram acima de 0,6 e corresponderam aos meses do período seco. De forma geral, houve predomínio de R^2 abaixo de 0,5 com as estações ao longo do ano (Figura 2.26).

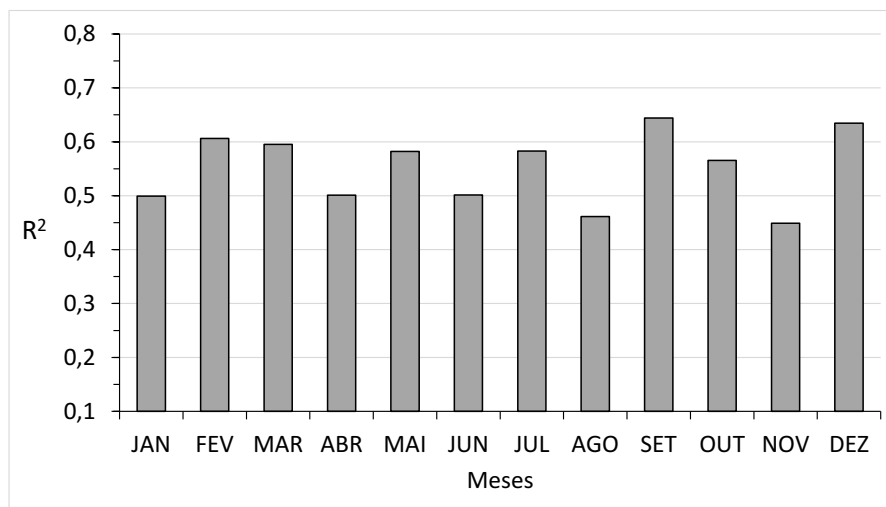


Figura 2.26 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Atalaia com as 11 restantes estações.

Quadro 2.21 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Atalaia.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	Maceió	0,67	81
Fev		0,67	
Mar	Usina Serra Grande	0,70	71
Abr		0,75	
Mai	União dos Palmares	0,76	73
Jun		0,63	
Jul		0,72	
Ago	Usina Serra Grande	0,74	71
Set		0,71	
Out	União dos Palmares	0,80	73
Nov	Murici	0,76	30
Dez		0,84	

Os resultados dos R^2 mensais apresentaram boas associações ao longo dos meses do ano com as estações Usina Serra Grande e União dos Palmares, situadas no setor intermédio, que distam 59,5 e 39 km, respectivamente da estação Atalaia (Quadro 2.21).

Há que ressaltar que houve bons graus de associação entre as estações situadas no setor montante no mês de fevereiro com a estação Caetés ($R^2=0,6$). No caso

das estações Brejão e Lajedo, atingiram 0,72 e 0,73 no mês de julho e, 0,74 e 0,6 no mês de dezembro, respectivamente (Tabela 10 do Anexo 1).

As associações com estas estações de montante se deram no período seco (fevereiro e dezembro) e úmido (julho). Pelo que se observa, as associações entre as estações são mais elevadas de março a dezembro com as estações situadas na metade inferior da bacia hidrográfica (Quadro 2.21).

No caso da estação Rio Largo, situada no setor jusante num interflúvio leste da bacia hidrográfica, a 62 m de altitude, teve um valor moderado de R^2 (0,4). Houve o predomínio de um conjunto de valores abaixo da média e outro conjunto de valores em torno de 0,5 que correspondem a alguns meses do período seco (setembro a dezembro) (Figura 2.27).

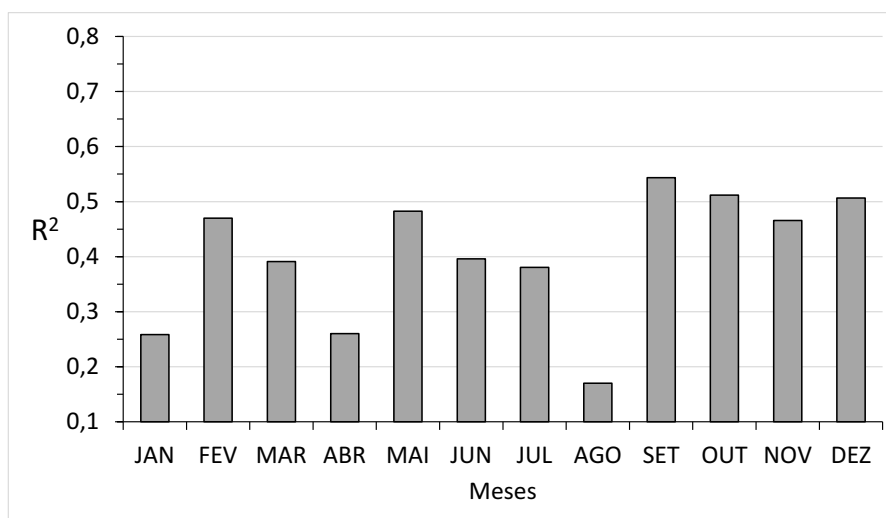


Figura 2.27 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Rio Largo com as 11 restantes estações.

As fracas associações mensais permanecem com a estação Rio Largo e estações situadas em seu entorno. Assim como os demais casos, os valores de R^2 foram maiores nos meses do período seco (setembro a dezembro) entre as estações mais distantes, Caetés a 117 km e Brejão a 100 km; as estações estão situadas a altitudes de 828 e 620 m, respectivamente, em interflúvios tal como a estação Rio Largo (Figura 2.15 e Quadro 2.22).

As fracas associações da estação Rio Largo com as estações do setor jusante estão explicadas pelo desvio da reta apresentados nos ensaios de análise de consistência de dupla acumulação (Figura 5 do Anexo 2).

Quadro 2.22 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Rio Largo da série 1963 – 1989.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	Murici	0,47	36
Fev		0,58	
Mar	Brejão	0,54	27
Abr	Jucati	0,45	36
Mai	Brejão	0,89	27
Jun	Atalaia	0,56	29
Jul		0,58	
Ago		0,40	
Set	Brejão	0,77	27
Out		0,80	
Nov	Caetés	0,65	28
Dez	Brejão	0,70	27

No que se refere aos resultados das associações da estação Maceió, situada no entorno do limite inferior da bacia hidrográfica, apresentou, assim como a estação Rio Largo, o R^2 médio fraco (0,4).

A maioria dos meses manteve R^2 abaixo de 0,3 e 0,4; a exceção é o máximo em maio (0,63) e o R^2 em torno de 0,5 em julho e outubro (Figura 2.28).

Os resultados de R^2 foram de baixo a “bom” com a estação União dos Palmares, mas no mês de maio houve associações moderadas com as estações de montante Garanhuns ($R^2=0,67$), num setor de altitude de 866 m, e Jucati ($R^2=0,74$), a 817 m (Tabela 12 do Anexo 1).

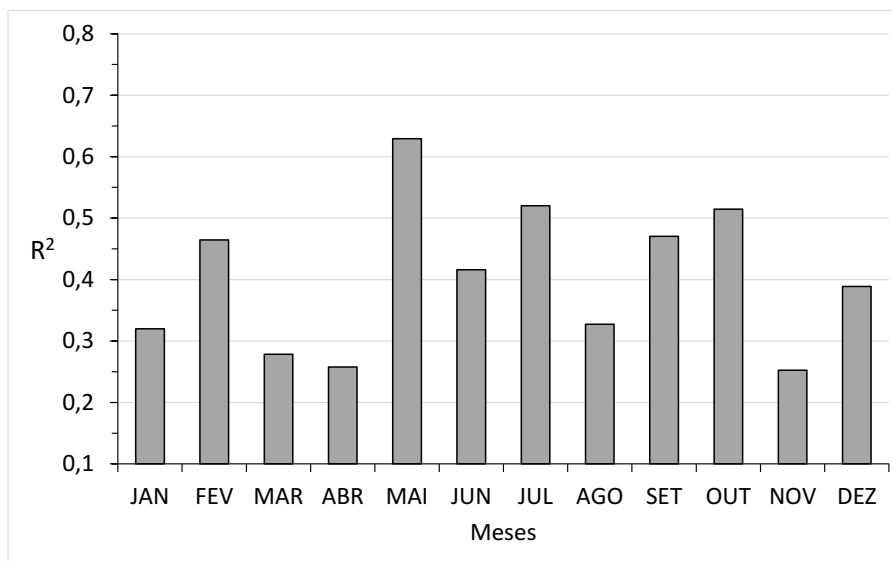


Figura 2.28 – Coeficiente de determinação (R^2) mensal médio da estação Maceió com as 11 restantes estações.

De forma geral, a estação Maceió apresentou correlações fracas com as estações mais próxima Rio Largo. Ao contrário dos demais casos, a estação Maceió manteve fraco R^2 no período seco de novembro a janeiro (Quadro 2.23). O que se constata é, em Maceió a precipitação é mais elevada e há chuvas de verão, o que a diferencia dos totais médios mensais das estações a montante.

Quadro 2.23 – Coeficientes de determinação (R^2) mensais mais elevados com a estação Maceió.

Mês	Estação	R^2	Nº de anos
Jan	Atalaia	0,67	81
Fev	Murici	0,71	31
Mar	Atalaia	0,56	81
Abr		0,59	
Mai	União dos Palmares	0,8	74
Jun		0,63	
Jul	Murici	0,74	31
Ago		0,58	
Set	Usina Serra Grande	0,6	72
Out	União dos Palmares	0,78	74
Nov		0,48	74
Dez	Atalaia	0,59	81

2.6.2.3 Enquadramento da série de precipitação anual 1963 – 1989

Das estações pluviométricas utilizadas na caracterização da precipitação na área de estudo, em sua maioria tiveram início de registro de dados nos anos de 1962 e 1963. Neste contexto, a estação de Atalaia possui a série mais longa, com início no ano de 1913; é a estação que obteve melhores correlações com todas as outras estações pluviométricas.

Além da estação Atalaia, selecionou-se a estação Usina Serra Grande com a segunda série mais longa e representativa do setor intermédio da bacia hidrográfica. Todas as outras estações para montante da estação Usina Serra Grande não possuem dados anteriores a 1963. Além disso, a escolha destas duas estações se deu por apresentarem menores quantidades de falhas nas séries de precipitação dentre as demais estações.

Sendo assim, buscou-se fazer o enquadramento da série de precipitação anual de 1963 a 1989 no período mais longo de medição das estações Usina Serra Grande, com 87 anos (1922 a 2008), e Atalaia com 78 anos (1913 a 1990) (Quadro 2.24).

Quadro 2.24 – Comparação de parâmetros estatísticos na estação Usina Serra Grande entre as séries 1922-1962 e 1963-1989.

Medidas estatísticas	Séries de precipitação anual		Diferença
	1922 – 2008	1963– 1989	
Nº de anos	87	27	60
Máxima (mm)	2353,9	1656,2	697,7
Decil 9 (mm)	1642	1552,6	89,3
Mediana (mm)	1211	1232,4	-21,4
Média (mm)	1273	1271,5	1,5
Decil1 (mm)	918,4	944,4	-26,0
Mínima (mm)	706,3	863,3	-156,9
Desvio padrão (mm)	302,7	256,5	46,2
Coef. de variação (%)	23,8	20,2	3,6

Quanto à estação Usina Serra Grande (Quadro 2.24), as medidas estatísticas de enquadramento da série mais curta na mais longa mostraram a média praticamente igual em ambos períodos. Como seria de esperar, as maiores diferenças observaram-se nos valores extremos, visto que o valor máximo tende a ser mais elevado e o valor mínimo tende a ser mais baixo nas séries mais longas.

Ao observar o coeficiente de variação, apesar da série de dados 1922 – 2008 ser três vezes maior que a do período estudado, a diferença é quase irrelevante (23,8 e 20,2 %, respetivamente).

A precipitação máxima é significativamente maior no período mais longo com diferença de 697,7 mm que corresponde a precipitação anual de 2 353,9 mm; o decil 9, a mediana e o decil 1 mostraram poucas diferenças entre as séries. A mediana e a média apresentaram diferença de 21,4 mm e 1,5 mm, respetivamente. A mínima foi maior no período mais curto e o desvio padrão foi maior no período mais longo.

Com isso, as medidas estatísticas apresentadas no Quadro 2.24, principalmente a mediana e a média, indicaram que a série mais curta pode ser considerada representativa do período mais longo.

Quanto aos resultados das medidas estatísticas da estação Atalaia apresentou no período mais longo o decil 9 um pouco mais elevado; a mediana, média e o decil 1 apresentaram valores equivalentes aos da série 1963 - 1989.

De acordo com os parâmetros estatísticos apresentados no Quadro 2.25 a série 1963 - 1989 é representativa do período mais longo, evidenciado pela mediana e média.

Com a análise comparativa das medidas estatísticas entre os dois períodos, percebe-se que a série 1963 – 1989 difere apenas nos máximos de precipitação anual, pelo que quando observados os demais parâmetros pode-se dizer que a série representa o regime da precipitação anual descrito pelas séries mais longas

das estações de Atalaia e Usina Serra Grande. Estas são apenas ligeiramente mais úmidas do que o período 1963 – 1989.

Quadro 2.25 – Comparação de parâmetros estatísticos na estação de Atalaia entre as séries 1913 – 1990 e 1963 – 1989.

Medidas estatísticas	Séries de precipitação anual		Diferença
	1913 - 1990	1963 - 1989	
Nº de anos	78	27	50
Máxima (mm)	2622,1	1784,9	837,2
Decil 9 (mm)	1928,4	1546,5	384,7
Mediana (mm)	1334	1356,0	2,5
Média (mm)	1365,1	1333,0	35,0
Decil 1 (mm)	941,1	1036,7	-96,5
Mínima (mm)	672,1	857,3	-185,2
Desvio padrão (mm)	388,7	226,6	163,9
Coeficiente de variação (%)	28,5	17,0	11,5

2.6.3 Qualidade e tratamento das séries anuais de precipitação

2.6.3.1 Análise de consistência das séries de precipitação anual

Os ensaios de dupla acumulação foram realizados a partir da precipitação anual acumulada comparado com a média acumulada das outras três estações de referência com maiores associações, definidas pelos maiores valores de R^2 (Quadro 2.11).

Com base neste método, modificações que tenham por base causas meteorológicas não se traduzem numa alteração da inclinação do alinhamento que demonstra a relação entre dois grupos de dados acumulados, visto que todas as estações de referência seriam igualmente afectadas. Para que não sejam descartados os registos de precipitação anual, consideram-se os critérios:

- i) as séries são aleatórias, ou seja, os valores de precipitação anual são independentes no tempo;
- ii) os processos de medição e os erros associados não sofreram alteração que impliquem a inconsistência das séries;
- iii) fatores físicos que influenciam a precipitação não foram alterados de forma a originar séries não homogêneas; por exemplo, pode ser decorrente de erros de leituras, mudança de tendência da série ou construções de reservatórios, lagos, açudes, próximo à estação.

No presente estudo, os ensaios de dupla acumulação foram realizados para as 12 estações pluviométricas com períodos em comum de 27 anos (1963 a 1989). Não foi possível utilizar estações adicionais para enquadrar as estações situadas em áreas periféricas da bacia hidrográfica, por causa da ausência de dados com períodos em comum naquela série.

Com a realização dos ensaios de dupla acumulação foram identificadas evidências de alterações de tendências nas estações Brejão e Rio Largo que indicaram erros de leituras e foram excluídas da análise mensal da precipitação. De acordo com os resultados dos ensaios de dupla acumulação constataram-se conjuntos de estações, com comportamentos similares, assim observa-se o comportamento geral que compõem três grupos:

- estações com alinhamento perfeito ou quase perfeito: Garanhuns, Correntes, Usina Serra Grande, União dos Palmares, Murici e Atalaia;
- estações com pequenas oscilações em torno da reta, mas que mantêm sempre o mesmo alinhamento: Caetés, Jucati, Lagedo e Maceió;
- estações com tendências bem marcadas de desvios, indiciadoras de problemas de leitura ou registro: Brejão e Rio Largo.

Obviamente, dentro de cada grupo há pequenas variações, mas o que se constata no comportamento geral, dentro do 2.º grupo, Maceió é a pior estação; e Rio Largo apresenta claramente o pior resultado nos ensaios de dupla acumulação.

2.6.3.2 Identificação e colmatção de falhas de dados pluviométricos

Com base nos cálculos do coeficiente de determinação (R^2) e análise de regressão linear simples constituíram as etapas para os procedimentos de preenchimento de de séries mensais que apresentavam lacunas de totais mensais e, para os totais anuais em falta, foram colmatados a partir da soma dos 12 totais mensais de precipitação.

Quadro 2.26 – Características das estações utilizadas nas correlações mensais utilizadas como referências para colmatção das falhas mensais.

Estação	Sigla	Estado	Coordenadas		Operadora	Altitude (m)
			Latitude (°)	Longitude (°)		
CAPOEIRAS	Cap	PE	-8,73	-36,63	IPA	882
JUCATI	Ju	PE	-8,71	-36,49	IPA	821
LAGEDO	La	PE	-8,66	-36,32	IPA	645
CAETÊS	Ca	PE	-8,77	-36,62	IPA	828
CALÇADO	Cal	PE	-8,4	-36,33	IPA	859
GARANHUNS	Ga1	PE	-8,88	-36,52	INMET	823
GARANHUNS	Ga2	PE	-8,88	-36,48	SUDENE	866
GARANHUNS	Ga3	PE	-8,95	-36,52	DNOCS	842
GARANHUNS	Ga4	PE	-8,88	-36,49	IPA	871
BREJÃO	Bre1	PE	-9,03	-36,57	IPA	776
BREJÃO	Bre2	PE	-9,06	-35,50	SUDENE	620
SÃO JOÃO	SJ	PE	-8,88	-36,37	IPA	711
ANGELIM	Ang	PE	-8,89	-36,29	IPA	655
BOM CONSELHO	BC	PE	-9,17	-36,68	DNOCS	654
CANHOTINHO(DNOCS)	Can	PE	-8,87	-36,20	APAC	660
LAGOA DO OURO	LO	PE	-9,13	-36,50	IPA	598
USINA SERRA GRANDE	USG	AL	-8,98	-36,07	USG	374
USINA SÃO JOSÉ DA	USJL	AL	-9,0	-36,05	CPRM	275
IBATEGUARA	Iba	AL	-8,98	-35,93	SUDENE	505
CORRENTES	Co	PE	-9,12	-36,33	APAC	391
SANTANA DO MUNDAÚ	SM	AL	-9,17	-36,22	CPRM	220
UNIÃO DOS PALMARES	UPD	AL	-9,17	-36,05	DNOCS	155
UNIÃO DOS PALMARES	UPR	AL	-9,17	-36,05	RFFSA	155
MURICI	Mu	AL	-9,31	-35,95	CPRM	82
FAZENDA BOA FORTUNA	FBF	AL	-9,47	-35,86	CPRM	42
ATALAIA	Ata	AL	-9,52	-36,02	DNOCS	54
PILAR	Pil	AL	-9,60	-35,90	INMET	131
RIO LARGO	RL	AL	-9,29	-35,50	DNOCS	62
MACEIÓ	Ma	AL	-9,57	-35,78	DNOCS	5

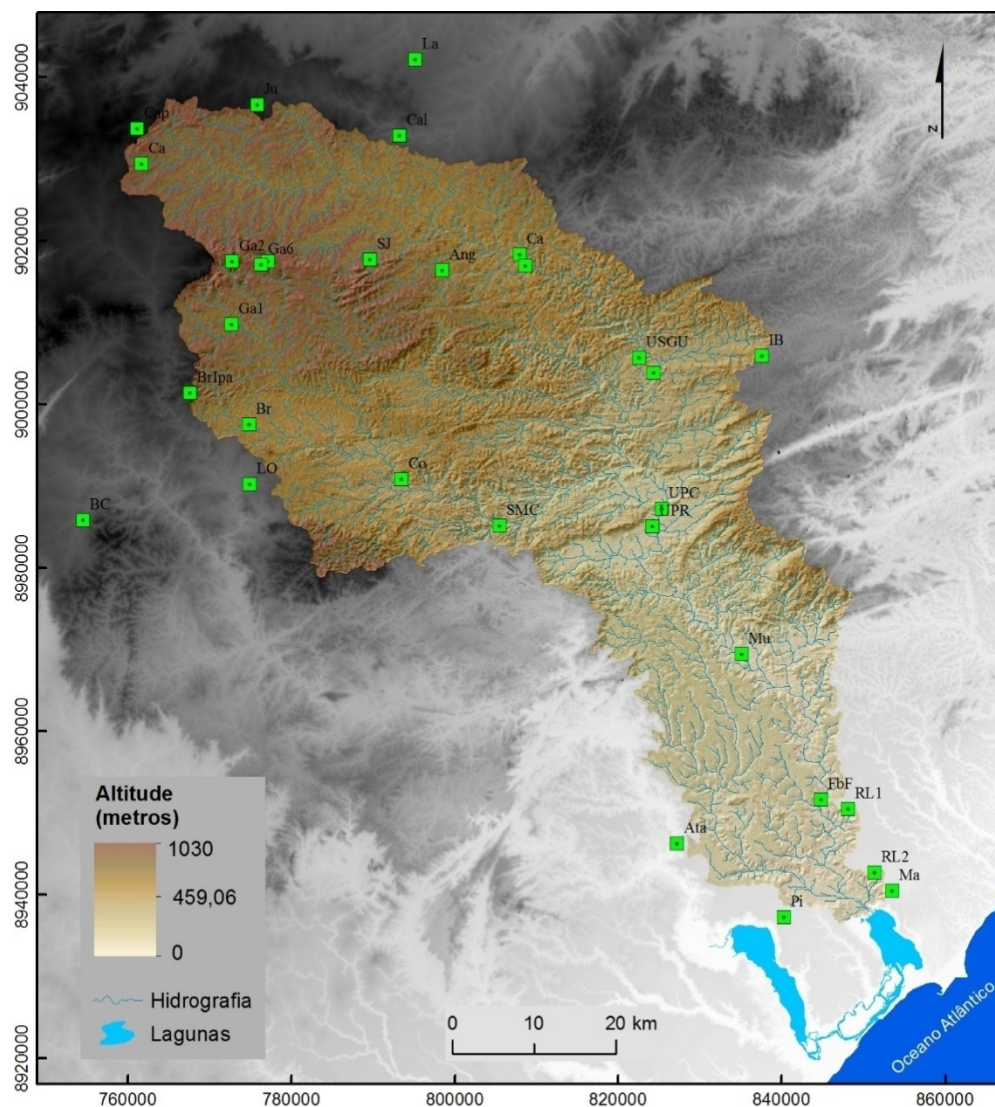


Figura 2.29 – Localização das estações pluviométricas utilizadas no cálculo dos coeficientes de correlação e de determinação entre as séries mensais.

O Quadro 2.27 mostra as séries anuais e respectivas falhas de dados mensais presentes em todas as estações pluviométricas. É possível observar que a estação de Jucati é a única que apresenta série completa para o período utilizado na análise da precipitação (1963 a 1989). No entanto, as demais estações exigiram o preenchimento das lacunas de dados mensais, a exemplo a estação de Garanhuns, que apresentou mais falhas diárias e que as falhas mensais se deram, no máximo, em dois meses dos anos da série analisada (Quadro 2.27).

Quadro 2.27 – Identificação de falhas das estações pluviométricas, no período 1963 a 1989.

Data	Ca	Ju	La	Bre	Ga	Co	USG	UP	Mu	At	RL	Ma
1963												
1964												
1965												
1966												
1967												
1968												
1969												
1970												
1971												
1972												
1973												
1974												
1975												
1976												
1977												
1978												
1979												
1980												
1981												
1982												
1983												
1984												
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												

Ca-Caetés; Ju-Jucati; La-Lagedo; Bre-Brejão; Ga-Garanhuns; Co-Correntes; USG-Usina Serra Grande; UP-União dos Palmares; Mu-Murici; At-Atalaia; RL-Rio Largo; Ma-Maceió.

	Falhas diárias ou mensal
	Falhas até 6 meses
	Falha superior a 6 meses
	Falha de ano completo

Foram realizadas as colmatações de falhas anuais das estações: Garanhuns no ano de 1963, Lagedo e Maceió em 1975 e Murici em 1979, para obter um período mais longo da série nas estações seleccionadas.

2.6.4 Distribuição temporal da precipitação

A análise espacial da precipitação foi realizada com base nos 27 anos em comum e tiveram as séries completadas por preenchimentos de falhas no período de 1963 a 1989, com exclusão das estações Brejão e Rio Largo; assim, foi possível analisar a precipitação anual e mensal a partir das estatísticas de medidas de tendência central.

2.6.4.1 Análise da precipitação anual

De acordo com o resumo das estatísticas descritivas (Quadro 2.28) constata-se um padrão médio de precipitação anual das estações num conjunto de três setores da bacia hidrográfica:

- montante (Caetés, Jucati, Lagedo e Garanhuns);
- intermédio (Correntes, Usina Serra Grande e União dos Palmares);
- inferior (Murici, Atalaia e Maceió).

Em relação ao comportamento da precipitação anual ao longo da série 1963 – 1989, de forma geral, as estações mostraram oscilações com volumes de precipitação diferentes nos setores supracitados. Em relação ao coeficiente de variação são similares nos três setores da bacia hidrográfica. A partir da comparação entre a média e a mediana pode observar com exceção das estações Jucati e Garanhuns, no setor de montante e, Atalaia e Maceió, no inferior, os valores medianos foram inferiores aos médios nas restantes estações o que constata o predomínio de anos com precipitação abaixo da média na maioria das estações (Quadro 2.28).

As estações Caetés, Jucati, Lagedo e Garanhuns, no setor de montante apresentaram totais anuais com oscilações abaixo ou acima da média a cada 4 ou 5 anos ao longo da série 1963 a 1989 (Figuras 1, 2, 3 e 4 do Anexo 3 e Quadro

2.28). Verificou-se um padrão médio homogêneo ao longo das séries nas estações supracitadas. Neste setor, na série analisada, em termos médios, a precipitação fica abaixo de 900 mm.

No setor intermédio, onde estão as estações Correntes, Usina Serra Grande e União dos Palmares constatou-se ao longo da série o aumento dos totais anuais. No caso da estação Correntes, os totais anuais no final da série foram significativamente elevados. Quanto à estação Usina Serra Grande, os totais máximos anuais apresentaram padrão ao longo da série e com tendência de aumento constatado também na série mais longa (1922 – 2008), caracterizada no ponto 2.6.4.3. Neste setor intermédio, as estações apresentaram média de 1100 a 1300 mm com tendência de aumento do volume de precipitação.

A jusante, no setor inferior, as estações Murici, Atalaia e Maceió apresentaram os maiores totais de precipitação na bacia hidrográfica. Com destaque para Murici e Maceió com tendência de aumento do volume precipitação ao longo da série.

No caso da estação Atalaia, há diminuição do volume de precipitação ao longo da série; este comportamento também foi observado na série completa (1913 - 1989) e analisado no ponto 2.5.2.3.

No caso da estação Maceió, apresentou totais anuais acima e próximo a média, e mostrou forte tendência de aumento da precipitação. Neste setor inferior, os totais médios são acima de 1300 a 1500 mm, é o setor mais chuvoso da bacia hidrográfica.

No que se refere ao padrão da precipitação na série 1963 - 1989, somente os anos 1970, 1980 e 1981 apresentaram totais anuais abaixo e o ano de 1986 acima da média em todas as estações (Figuras 1, 2, 3 e 4 do Anexo 3). Para a avaliação da precipitação anual foi obtido resumo das estatísticas a partir dos totais anuais das estações pluviométricas (Quadro 2.28).

Quadro 2.28 – Medidas estatísticas da precipitação anual (mm) (1963 a 1989).

Estação	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Média (mm)	Mediana (mm)	Desvio padrão	Coeficiente de variação
Caetés	344,2	1437,0	767,7	725,3	283,4	37
Jucati	434,3	1068,2	717,3	734,5	192,1	27
Lagedo	468,0	1910,9	857,9	810,0	317,0	37
Garanhuns	493,8	1221,1	873,2	909,2	173,1	20
Correntes	560,8	2867,3	1240,2	1158,9	436,5	35
Usina Serra Grande	863,3	1656,2	1245,8	1189,9	250,3	20
União dos Palmares	727,7	1787,8	1252,9	1173,4	293,0	23
Murici	946,5	2118,8	1479,9	1456,2	313,4	21
Atalaia	857,3	1784,9	1333,0	1356,0	226,5	17
Maceió	598,4	2864,1	1534,5	1544,5	569,5	37

E em relação à estação Brejão e Rio Largo, foi descrito de forma pontual as estatísticas destas estações em séries distintas. A estação Brejão apresentou totais anuais muito acima da média no início da série, e Rio Largo, nos anos finais, facto comprovado com as inconsistências apresentadas nos ensaios de dupla acumulação de ambas estações. Por isto, foram descritas as estatísticas destas duas estações com exclusão dos 4 primeiros anos da série da estação Brejão e os 8 finais da estação Rio Largo. Com efeito de comparação foi elaborado o resumo estatístico referente aos anos 1967 a 1989 para a estação Brejão e 1963 a 1981 para Rio Largo (Quadro 2.29).

Quadro 2.29 – Medidas estatísticas da precipitação anual (mm) das estações Brejão (1967 – 1989) e Rio Larago (1963 - 1981).

Estação	Mín (mm)	Máx (mm)	Média (mm)	Mediana (mm)	Desvpad (mm)	Coef. Variação (%)
Brejão	616,4	2685,8	1637,3	1511,7	549,7	0,34
Rio Largo	785,2	2697,6	1880,0	1899,1	536,5	0,29

A estação Brejão se enquadra no setor intermédio e apresentou média anual mais elevada, e a mediana foi inferior à média o que indica a maior quantidade de anos abaixo da média. Em relação a estação Rio Largo, situada no setor inferior da bacia hidrográfica, mostrou a média mais elevada neste setor. Em ambas as estações foram constatadas tendências de decréscimos dos volumes de precipitação (Figuras 5 e 11 do Anexo 3).

Portanto, há um aumento de precipitação de montante para jusante na bacia hidrográfica. E também, há o aumento de precipitação de leste para oeste, ou seja, do interflúvio da margem esquerda para o interflúvio da margem direita, mas apenas na metade inferior da bacia hidrográfica.

2.6.4.2 Análise da precipitação mensal

Com a caracterização da precipitação anual na bacia hidrográfica do rio Mundaú, onde foi observada a irregularidade do regime anual de precipitação nos diferentes setores, com distintas tendências crescente e decrescente, buscou-se neste ponto analisar o comportamento mensal da precipitação das estações e identificar os períodos secos e húmidos na bacia hidrográfica. As estações Brejão e Rio Largo, por apresentarem inconsistência dos dados nos ensaios de dupla acumulação, foram excluídas desta análise de precipitação mensal.

Esta análise mensal da pluviometria foi feita a partir das médias mensais de cada estação pluviométrica, a fim de observar a variação média mensal na bacia hidrográfica no período 1963 a 1989 e, assim, foram calculadas as médias mensais das 10 estações (Figura 2.30) e os resumos das estatísticas (Quadros 1 ao 10 do Anexo 4).

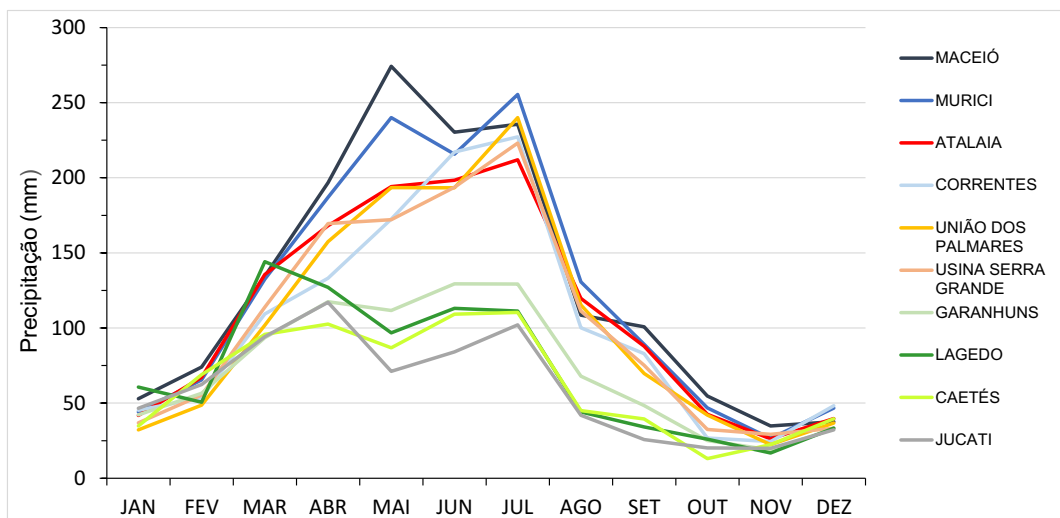


Figura 2.30 – Precipitação mensal média (mm) das estações pluviométricas.

Pelo que se observa nas médias mensais (Figura 2.30), o período de precipitação mínima vai de outubro a fevereiro (5 meses) e o período úmido apresenta-se sensivelmente de abril a agosto, em que março e setembro enquadram-se como meses de transição. Durante o período úmido há tendência de 2 picos de precipitação, um deles em julho que é comum a todas as estações.

São exceções a este comportamento comum: no período de precipitações mínimas, a diferenciação entre os quantitativos de precipitação nas estações é muito pequena, e é no período úmido que se estabelece a grande diferença entre as estações, com totais muito mais baixos no setor montante e muito mais elevados no setor jusante; Lagedo é a única estação que possui o máximo absoluto em março, portanto fora do período úmido para as outras estações (no entanto, esta estação está claramente fora da bacia hidrográfica, para nordeste do seu interflúvio principal); quanto ao resto, tem comportamento semelhante ao das estações do setor montante.

No período de março a abril, observa-se o comportamento de elevação do volume de precipitação tanto a montante como a jusante, com máxima no mês de abril na estação Jucati (Anexo 3); em maio, a recessão da precipitação de montante é contrastada com o pico de precipitação média a jusante. Neste mesmo mês, 5 estações tiveram valores máximos (Lajedo, Garanhuns, Murici e Atalaia); no mês

de junho, é verificado o aumento da precipitação no setor de montante e decréscimo no intermédio e inferior. Os casos de precipitações mensais mais elevadas ocorreram em julho em 5 estações (Caetés, Correntes, Usina Serra Grande, União dos Palmares e Maceió) predominantes no setor intermédio e inferior da bacia hidrográfica.

Em ambos setores de montante e inferior, no final do período úmido, fim de julho a agosto, houve decréscimo do volume de precipitação. Neste período, de transição do úmido ao seco, a estação Caetés apresenta tendência similar às estações do setor intermédio e inferior. Esta estação apresentou desvio padrão acima da média desde agosto a dezembro.

Percebe-se um padrão ao observar os quadros do Anexo 3: nos meses de setembro a fevereiro os valores mínimos de precipitação são comuns em todas as estações pluviométricas. Além do mais, a mediana é menor do que a média nas estações, o que indica tendência dos totais mensais abaixo da média na bacia hidrográfica.

Quanto ao desvio padrão, as variações foram superiores às médias nos meses de outubro, novembro e dezembro nas séries das estações pluviométricas de montante Jucati, Lajedo e Garanhuns e, no setor intermédio ao inferior, as estações Correntes, Usina Serra Grande, União do Palmares e Maceió.

No caso da estação Murici, o desvio padrão foi superior à média nos meses de novembro e dezembro, como também na estação de Jucati desde setembro a outubro. Isto acontece nos meses de verão, período seco, e se reflete nos elevados coeficientes de variação das estações. Por exemplo, no mês de outubro, na estação Correntes, o coeficiente de variação foi de 223,9 %.

Portanto, de acordo com a análise da média mensal e das estatísticas da precipitação na bacia hidrográfica constatou-se que no período úmido, entre abril e agosto, na maior parte dos casos, são os meses das séries de precipitação que

possuem menor irregularidade, constatado pela média e mediana com valores muito próximos e com menores coeficientes de variação.

No que se refere ao período de precipitação mínima, os meses de janeiro e fevereiro apresentaram valores próximos da média e mediana, mas os coeficientes de variação foram um pouco mais elevados, mas ainda assim muito abaixo do que os valores apresentados nos meses de maiores coeficientes de variação: outubro, novembro e dezembro.

De acordo com a análise da média mensal de precipitação na bacia hidrográfica, pode-se concluir que existem dois setores na bacia hidrográfica com patamares diferentes de precipitação médio mensal. Um situado na cabeceira da bacia hidrográfica, representado pelas estações Jucati, Caetés e Garanhuns, com menores valores médios mensais. e o outro setor, representado pelas estações Correntes, Usina Serra Grande, União dos Palmares, Murici, Atalaia e Maceió.

Esta diferença de precipitação na bacia hidrográfica está associada às barreiras geográficas formadas por altiplanos no setor superior da bacia hidrográfica, onde estão situadas as estações de Jucati, Caetés, Lajedo e Garanhuns (Figura 2.31). Os altiplanos e as escarpas do planalto da Borborema formam barreiras de massas de ar úmidas proveniente do Oceano Atlântico, que reduz a umidade relativa e favorece a diminuição da precipitação (Reboita *et al.*, 2016; Francisco *et al.*, 2015) num setor mais seco da bacia hidrográfica.

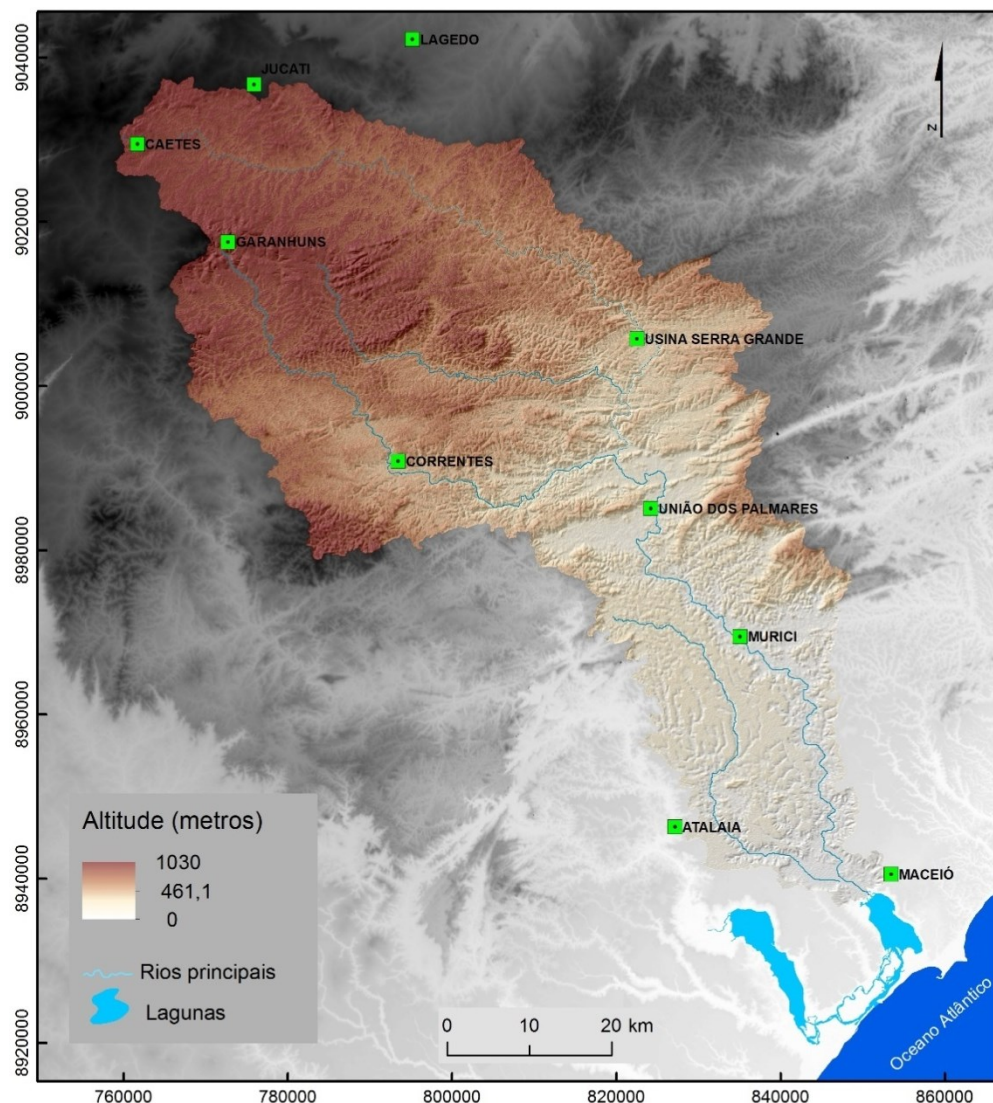


Figura 2.31 – Localização das estações pluviométricas com período em comum na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

No setor intermédio, os volumes de precipitação média são mais elevados, mas as escapas do planalto da Borborema oferecem dificuldades à circulação atmosférica, onde se observam volumes de precipitação inferiores aos das estações de jusante. Dessa maneira, as precipitações são mais elevadas no setor inferior devido ao facto de estar sob influência direta do oceano Atlântico associado à humidade local num ambiente de mata atlântica de moderados interflúvios e baixas altitudes, que promovem a circulação das massas de ar sem grandes barreiras.

2.6.5 Síntese das condições climáticas

De acordo com os autores supracitados, os principais mecanismos produtores de precipitação na bacia hidrográfica são provenientes do Oceano Atlântico, que transportam umidade para o continente. Estes mecanismos correspondem à onda de leste, às variações sazonais da Zona de Convergência Intertropical (ZCI) que compõem os sistemas responsáveis pelos elevados índices pluviométricos na bacia hidrográfica.

Os relevos do planalto da Borborema tornam-se barreiras aos ventos sudeste, mais intensos, e neste setor da bacia hidrográfica fazem diminuir a umidade que, adentram o território no sentido das escarpas do planalto da Borborema, mas no setor inferior estes ventos de sudeste penetram sem grandes interferências e fornecem umidade.

No caso dos ventos de leste, atuam sem grandes barreiras orográficas no setor inferior da bacia hidrográfica enquanto sofrem interferências das bordas do planalto da Borborema que dificultam a circulação destes ventos e o transporte de umidade para os interflúvios oeste da bacia hidrográfica.

No que se refere à precipitação, os totais anuais possuem grandes diferenças entre as estações e com distintas tendências, que demonstram a heterogeneidade dos totais anuais entre as estações, que se refletiram em sua grande maioria em fracos coeficientes de determinação utilizando-se os 27 anos de dados (1963 – 1989). Pelo que se observa, os maiores valores de R^2 se mantiveram entre as estações Garanhuns, Correntes, Usina Serra Grande, União dos Palmares, Murici e Atalaia, essas estações apresentaram consistências nos ensaios de dupla acumulação e menores variações relativas.

No entanto, as estações Brejão e Rio Largo apresentaram inconsistências nos ensaios de dupla acumulação, que indicam erros de medições. Em relação a estação Maceió, também apresentou fracas correlações mensais com desvios em relação à linha de tendência.

As inconsistências nos dados associam-se a alterações ambientais no entorno da estação, além das estações serem administradas por diferentes instituições responsáveis com calibrações diferentes (automáticos e convencionais).

Em relação aos resultados dos coeficientes de determinação (R^2), em termos médios mensais as estações indicaram associações mais elevadas nos meses do período seco – fevereiro, setembro e dezembro – e, no período úmido, os meses de maio e julho.

No que se refere ao período seco de precipitação mínima, as maiores médias do coeficiente de determinação podem ser explicadas pelas ocorrências de precipitações nesse período e, no período úmido, os meses de maio e julho são os meses mais chuvosos em comum entre as estações.

De forma geral, as associações mensais nos setores montante, intermédios e inferior se deram, em grande parte, nos meses que correspondem ao período seco. Os meses de novembro e dezembro, por possuírem menores volumes de precipitação, apresentam associações da precipitação com as estações desde o setor montante ao inferior da bacia hidrográfica. É nos meses do período seco que a variação relativa da precipitação é maior, e menor no período úmido.

Pelo que se observa, as maiores associações entre as estações foram para as situadas desde o setor intermédio ao inferior, com destaque para a estação Murici, que manteve maiores associações com as estações deste setor.

Das associações mensais, as alcançadas entre as estações Caetés e Jucati apresentaram valores inferiores às demais estações. A estação Caetés mostrou pequena a moderada associações com as estações do setor intermédio no período seco e, no úmido, moderado com a estação Jucati.

No caso da estação Jucati, manteve maiores associações com a estação do setor superior e intermédio. Quanto à estação Lagedo, apresenta estação chuvosa diferenciada das outras estações, o período chuvoso desta estação inicia em janeiro/fevereiro com término em setembro, podendo se adiantar até outubro

(Beltrão *et al.*, 2005), típico de um microclima situado no entorno do limite superior da bacia hidrográfica, o que explica as associações entre as estações do setor intermédio da bacia hidrográfica.

No caso da estação Garanhuns, pela sua localização situada num setor de interflúvio manteve associações elevadas entre as estações desde montante a metade inferior da bacia hidrográfica.

As associações foram elevadas num conjunto de estações: Correntes, Usina Serra Grande, União do Palmares, Murici e Atalaia, principalmente nos meses mais chuvosos. Com efeito, a precipitação manteve associações mensais no setor intermédio e inferior da bacia hidrográfica.

Em relação às estações Brejão e Rio Largo, devido as inconsistências dos dados no período comum 1963 – 1989 apresentaram elevadas associações entre si, no entanto o esperado seriam fracas associações devido a diferença de setores entre as estações: Brejão está situada no setor intermédio superior numa altitude de 620 m e distante a 87 km da estação Rio Largo situada no setor inferior a 62 m de altitude.

No caso da estação Maceió, situada no entorno da bacia hidrográfica nos tabuleiros costeiros, a 97 m de altitude, manteve menores associações entre as estações por apresentar maiores patamares de precipitação com chuvas nos meses do período seco, chuvas de verão, o que evidencia menores associações entre as estações nos meses de novembro e dezembro.

Se observa na bacia hidrográfica na série 1963 – 1989 que os meses maio e julho são os mais chuvosos e apresentaram menores coeficientes de variação; os meses de outubro, novembro e dezembro constituem o período seco com maior variação relativa da precipitação, pois apresenta ausência e presença de chuvas nesse período. Mas, de forma geral, as precipitações anual e mensal na bacia hidrográfica mantêm elevada variação relativa e se observa diferentes padrões de precipitação na bacia hidrográfica, que diminui de montante para a jusante com

melhor associação relativa da precipitação entre as estações situadas na metade inferior da bacia hidrográfica. Portanto, como já mencionado, de acordo com a análise climática há o decréscimo de precipitação de montante para a jusante e do interflúvio leste a oeste na metade inferior da bacia hidrográfica.

2.7 Caracterização demográfica e socioeconômica

Neste ponto é feita a caracterização da evolução da população e da socioeconomia dos municípios que estão compreendidos na bacia hidrográfica do rio Mundaú, pelos dados dos censos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. No caso da população, utilizou-se os dados dos censos dos anos 2000, 2010 e população estimada para 2018; a comparação da população urbana e rural é feita para os anos 2000 e 2010 e a densidade demográfica para o ano de 2010.

Em relação aos indicadores sociais de índice de pobreza, tiveram por base os dados do Censo Demográfico 2000 e Pesquisa de Orçamentos Familiares - POF 2002/2003 elaborado pelo IBGE, e o índice de desenvolvimento humano (IDH) referente aos anos 1991, 2000 e 2010.

Analizou-se, também, a socioeconomia pelo Produto Interno Bruto (PIB) nos anos 2000 e 2010, dos municípios que se inserem totalmente na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

2.7.1 População residente

Neste ponto foi realizada a caracterização da população dos municípios que estão total ou quase totalmente inseridos na bacia hidrográfica do rio Mundaú (Figura 2.32).

Os municípios caracterizados foram: no estado de Pernambuco, Angelim, Brejão, Caetés, Calçado, Canhotinho, Capoeiras, Correntes, Garanhuns, Jupi, Jucati, Lagoa do Ouro, Garanhuns, Palmeirina e São João; no estado de Alagoas,

Atalaia, Branquinha, Ibateguara, Murici, Rio Largo, Santa Luzia do Norte, Santana do Mundaú, São José da Laje e União dos Palmares. Merece destacar, que na área de estudo o município de Maceió corresponde apenas a uma pequena parcela do seu território e a população está concentrada na grande Maceió, portanto, foi excluído da tabulação dos dados e, pelo mesmo motivo foram excluídos os municípios de Chá Preta, Pilar, Messias, Quebrangulo, Flexeiras e Capela que não compreendem a área urbana e sedes municipais na área de estudo. Os dados desses municípios superestimam a caracterização populacional na bacia hidrográfica. E, no Estado de Pernambuco, pelo mesmo motivo, foram excluídos os municípios de Lagedo, Jurema, Quipapá e Quebrangulo.

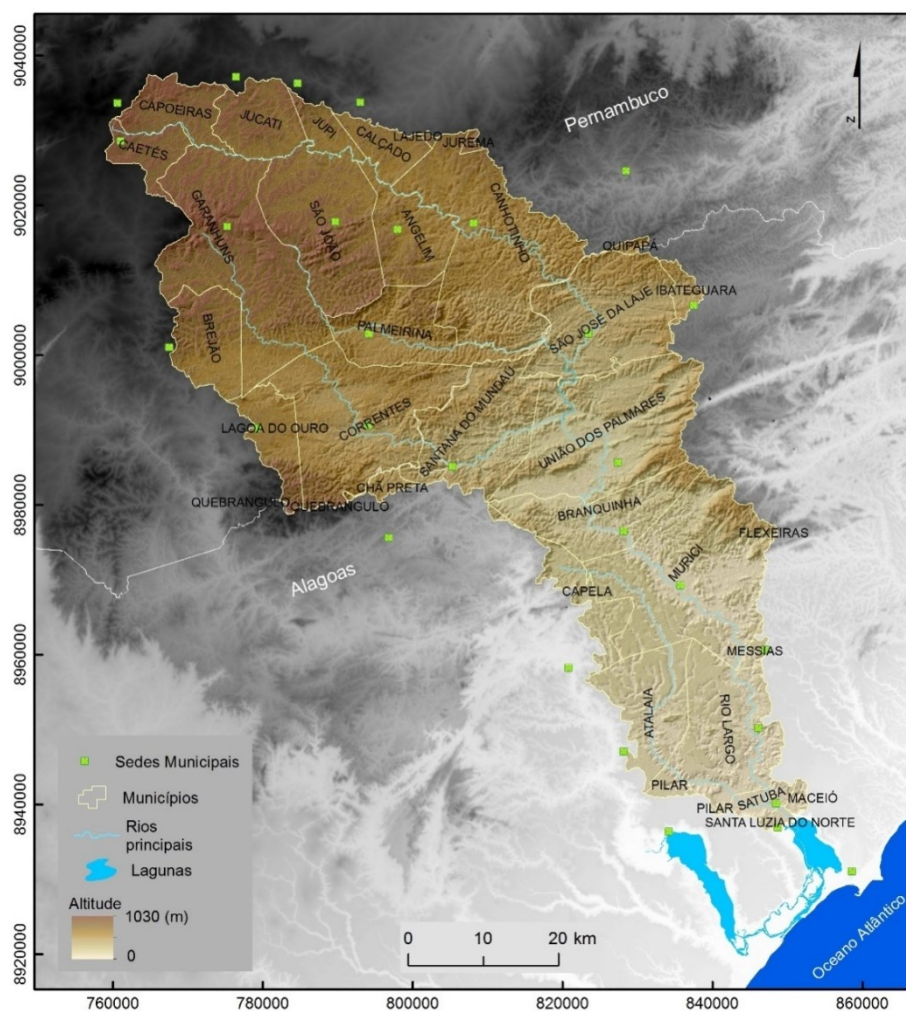


Figura 2.32 – Localização dos limites dos Estados de Pernambuco e Alagoas, dos municípios e respectivas sedes municipais.

Na maioria dos municípios houve aumento da população de 2000 a 2018; no entanto, os municípios Calçado, Satuba, Mundaú e Branquinha apresentaram redução da população nesse período, e os municípios de Brejão e Canhotinho também mantiveram decréscimos da população nos anos 2000 a 2010 (Quadro 2.30).

Quanto à densidade demográfica, foram maiores nos municípios de Garanhuns e Jupi, situados no setor montante da bacia hidrográfica no estado de Pernambuco (Quadro 2.30 e Figura 2.33).

Quadro 2.30 – População residente em municípios totalmente compreendidos na bacia hidrográfica do rio Mundaú, de 2000 a 2018.

Municípios	Área (km ²)	População residente			Densidade demográfica(hab/ km ²) (2010)
		2000	2010	*2018	
Capoeiras	87,93	19 556	19 593	20 048	58
Caetés	58,29	24 137	26 577	28 570	80
Jucati	99,660	9695	10 604	11 361	88
Jupi	39,18	12 329	13 705	14 747	130
Calçado	56,87	11 709	11 125	11 089	91
Garanhuns	381,21	117 749	129 408	138 983	282
Brejão	114,98	8916	8844	8999	55
São João	258,66	19 744	21 312	22 686	82
Angelim	118,20	9082	10 202	11 072	86
Canhotinho	375,16	24 920	24 521	24 835	58
Lagoa do ouro	80,87	10 977	12 132	13 065	61
Palmeirina	158,24	9 536	8 189	7 789	52
Correntes	328,51	17 044	16 330	18 144	53
Santana do Mundaú	217,31	11 534	10 961	10 755	49
São José da Laje	254,88	21 071	22 686	23 855	88
Ibateguara	23,75	15105	15149	15606	57
União dos Palmares	352,59	58.620	62.358	65461	148
Branquinha	160,21	11 325	10 583	10 529	63
Murici	390,5	24 671	26 710	28 137	62
Messias	11,23	11 990	15 682	17 676	137
Rio largo	219,44	62 510	68 481	74 838	223
Atalaia	145,18	40 552	44 322	47 000	83
Satuba	27,9	12 555	14 603	13 716	342
Santa luzia do Norte	7,54	6388	6841	7272	232

*População estimada.

E no território alagoano, os municípios situados no setor intermédio e inferior da bacia hidrográfica possuem as maiores densidades demográficas em 2010. O município de União dos Palmares apresentou 148 hab/km² e, no setor de jusante, concentram-se as maiores densidades demográficas nos municípios de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte (Quadro 2.30 e Figura 2.33).

Esta concentração demográfica neste setor inferior da bacia hidrográfica está associada à proximidade da região metropolitana de Maceió e em razão das maiores aglomerações urbanas existentes na Zona da Mata alagoana.

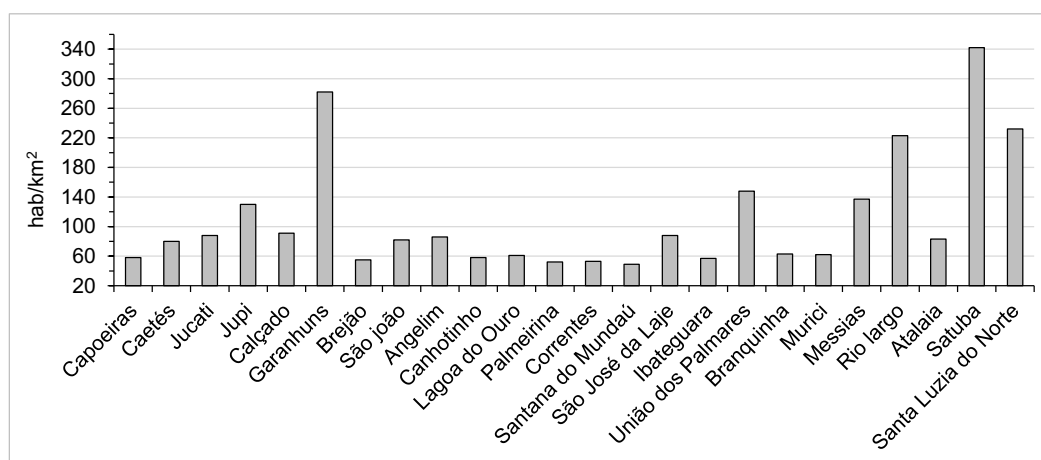


Figura 2.33 – Densidade demográfica (hab/km²) dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú no ano de 2010.

No que se refere à população residente, procurou-se apresentar a evolução da população rural e urbana, que foram caracterizadas nos períodos de 2000 e 2010.

De maneira geral, a população rural em 2000 a 2010 apresentou decréscimo nos municípios de Pernambuco e de Alagoas, o município de União dos Palmares manteve o maior decréscimo da população rural de 2000 a 2010 (Quadro 2.32). A exceção, os municípios de Caetés, Jucati e Ibateguara, que apresentaram crescimento da população rural (Quadro 2.31).

Em relação à população urbana, observou-se na grande maioria dos municípios o crescimento positivo da população urbana. Mas, os municípios São João, Santana do Mundaú e Ibateguara apresentaram decréscimo da população urbana.

Os municípios com maiores totais de população urbana na bacia hidrográfica estão no estado de Pernambuco, em Garanhuns, Canhotinho e Correntes, e no de Alagoas, em União dos Palmares, Murici, Rio Largo e Satuba.

De acordo com a evolução da população rural e urbana, no período analisado, foi possível constatar o aumento da população urbana ao longo dos 10 anos e o decréscimo da população rural.

Quadro 2.31 – População residente nas áreas urbanas e rurais dos municípios

Município	Rural		Urbano	
	2000	2010	2000	2010
Capoeiras	14 713	13 330	4843	6263
Caetés	18 629	19 057	5508	7520
Jucati	7418	7776	2277	2828
Jupi	6544	5349	5785	8356
Calçado	8444	7315	3265	3810
Garanhuns	14 314	14 052	103 435	115 356
Brejão	5699	5280	3217	3564
São João	7144	11 656	12 600	9656
Angelim	4539	4115	4543	6087
Canhotinho	12 659	10 415	12 261	14106
Lagoa do ouro	6429	6103	4548	6029
Palmeirina	4746	3011	4790	5178
Correntes	8200	7090	8844	10329
Santana do Mundaú	5352	5303	6182	5658
São José da Lage	8551	7295	12 520	15 391
Ibateguara	6828	9335	8277	5814
União Palmares	20 751	14 707	37 869	47651
Branquinha	5437	3910	5888	6673
Murici	7186	4602	17 485	22 108
Messias	2438	1419	9552	14 263
Rio Largo	12 591	12 534	49 919	55 947
Atalaia	22 603	21 865	17 949	22 457
Satuba	2580	1811	9975	12 792
Santa Luzia do Norte	942	719	5446	6172

No que se refere a localização das áreas urbanas estão em grande parte situadas em planície de inundação, o que tornam as pessoas expostas a eventuais

fenômenos perigosos de inundações fluviais, principalmente no setor intermédio e inferior da bacia hidrográfica, onde se concentram os municípios com as maiores densidades demográficas (Figura 2.32).

2.7.1.1 Indicadores sociais da população dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú

Também procurou-se descrever o perfil social da população residente na bacia hidrográfica a partir das porcentagens da incidência da pobreza nos municípios que compõem a bacia hidrográfica do rio Mundaú. As estimativas destes indicadores pelo IBGE são elaboradas pelo método da estimativa de pequenas áreas de acordo com Elbers *et al.* (2002).

Para tanto, a incidência da pobreza na bacia hidrográfica apresentou média de 55,7 %, máxima de 68,1 % e a mínima 43,4 %. Nos municípios de Pernambuco a média da incidência da pobreza é de 55,7 %, a máxima de 68,1 % que corresponde ao município de Caetés (Pernambuco) e a mínima de 43,4 % em Garanhuns. Enquanto que em Alagoas, os valores da incidência da pobreza têm um leve aumento nas estatísticas básicas; a média foi de 61,85 %, a máxima de 66,8 % e mínima de 57,45 %.

Apenas os municípios de Brejão, Calçado e Garanhuns apresentam valores de incidência da pobreza abaixo de 50 % (Figura 2.34). Os demais municípios apresentam valores acima desse limite, entre os quais todos os municípios no estado de Alagoas.

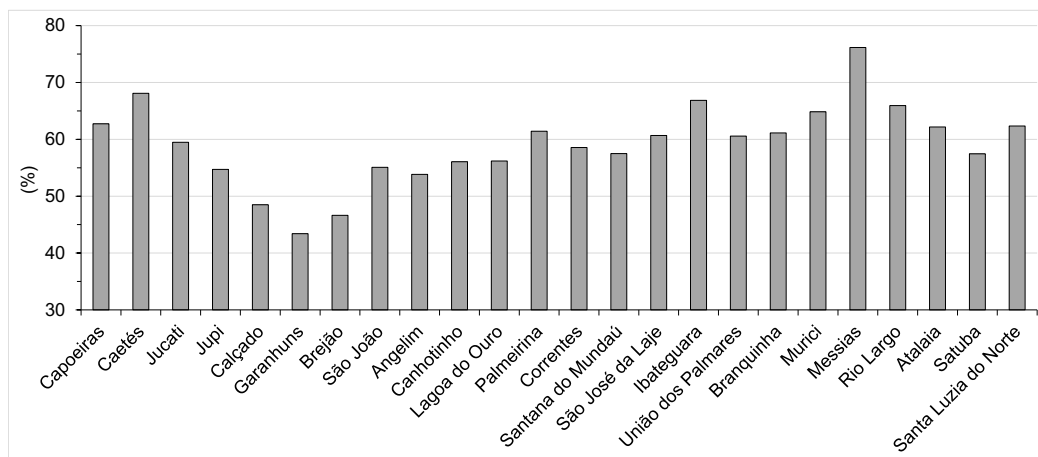


Figura 2.34 – Distribuição da incidência da pobreza (%) da população nos municípios situados na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Portanto, os dados mostram que na bacia hidrográfica há agravantes sociais quanto à incidência da pobreza, o que torna as populações socialmente vulneráveis.

Quando ao índice de Desenvolvimento Humano (IDH) dos municípios é crescente ao longo dos 20 anos (Figura 2.35); neste período, os valores máximos de IDH foram alcançados nos municípios de Garanhuns, Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte.

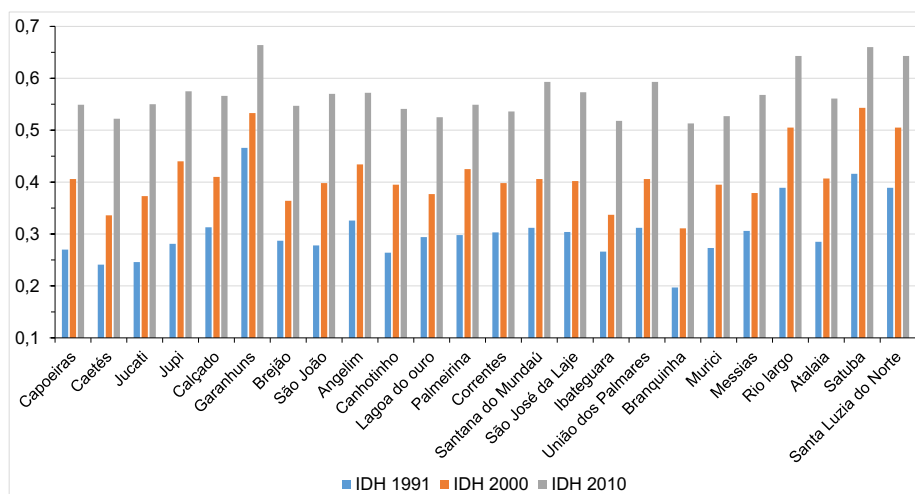


Figura 2.35 – Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da população dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú, nos anos de 1991, 2000 e 2010.

Os mínimos IDH foram alcançados pelo município de Branquinha com a pontuação de 0,197 no ano de 1991, 0,311 em 2000 e 0,513 em 2010.

Quadro 2.32 – Resumo das estatísticas de IDH para os residentes nos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Medidas	IDH 1991	IDH 2000	IDH 2010
Média	0,320	0,429	0,584
Máxima	0,507	0,584	0,721
Mínima	0,197	0,311	0,513

De acordo os cálculos estatísticos, em média, o IDH dos municípios da bacia hidrográfica é de 0,313 no ano de 1991, de 0,42 no ano de 2000 e de 0,575 em 2010. Portanto, o IDH médio, máximo e mínimo tem aumentado ao longo dos anos 1991, 2000 e 2010, mas ainda é representativo da falta de uma boa condição de vida para a população nos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú (Quadro 2.32), o que torna as populações mais vulneráveis aos fenômenos naturais perigosos.

2.7.2 Socioeconomia

A caracterização socioeconômica é descrita a partir dos dados da série revisada de 2010 e 2015, que tem como referência o ano de 2010 e segue a nova referência das Contas Nacionais dos dados do IBGE. Os dados socioeconômicos utilizados nesta caracterização foram: Produto Interno Bruto (PIB) (Quadro 2.33).

2.7.2.1 Produto interno Bruto (PIB) na bacia hidrográfica do rio Mundaú

De acordo com os dados anuais do produto interno bruto referentes aos anos 2010 e 2015 há aumento do PIB nos municípios e o setor de produção que lidera a participação no PIB é o de serviços, seguidos pelos setores agropecuário e o industrial (Quadro 2.33, Figura 2.36 e Figura 2.37).

O município de Garanhuns, no estado de Pernambuco, é primeiro na hierarquia dos municípios, com maior participação do PIB no setor de serviços, depois o industrial e a menor participação no setor agropecuário. Em segundo lugar na hierarquia, o município de Rio largo, no estado de Alagoas, apresenta maior participação no PIB também no setor de serviços, crescente no ano de 2015.

De acordo com os dados, se pode observar que o setor de serviços nos municípios de Calçado, Angelim, Correntes, Messias e Satuba superaram o agropecuário na participação no PIB no ano 2015. E no setor agropecuário, os municípios de Brejão, Santana do Mundaú, Ibateguara, Branquinha, Murici e Atalaia são os municípios com maiores participações no PIB nos anos de 2010 e 2015; em relação aos municípios de São José da Lage e Satuba no ano 2015, o setor industrial teve a participação no PIB superada pelo agropecuário (Figura 2.36 e Figura 2.37).

De acordo com os dados do IBGE referentes aos anos de 2010 e 2015 dos setores de produção (agropecuária, indústrias e Serviços) o setor de serviços é o responsável pelos maiores valores de contribuição no PIB, com aumento da contribuição do setor de serviços no ano de 2015.

Isto indica que os investimentos têm sido maiores no comércio, sendo carente de investimento nos setores secundários representados pelas indústrias nos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú. E o setor agropecuário vem reduzindo a participação no PIB de 2010 a 2015 com o aumento significativo do setor de serviços.

Quadro 2.33 – Produto Interno bruto (PIB) dos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Municípios	Valores do PIB (x 10 ³ R\$)	
	2010	2015
Capoeiras	99 091,00	149 697,99
Caetés	93 503,00	194674,07
Jucati	47 854,00	81 002,63
Jupi	64 570,00	113 351,98
Calçado	51 404,00	92 919,42
Garanhuns	1 201 193,00	1 981 576,60
Brejão	51,371,00	93 501,16
São João	97,079,00	165 816,54
Angelim	47,342,00	94 042,74
Canhotinho	98,519,00	172 360,28
Lagoa do Ouro	48,887,00	93 700,56
Palmeirina	36,329,00	63 392,23
Correntes	75,904,00	125 913,67
Santana do Mundaú	198,730,00	385 080,17
São José da Laje	199,791,00	316 138,43
Ibateguara	118,972,99	118 972,99
União dos Palmares	437 457,00	771 565,87
Branquinha	65 198,00	75 406,28
Murici	141 080,00	242 170,62
Messias	86 801,00	147 325,54
Rio largo	489 700,00	854 863,61
Atalaia	290 761,00	493 152,37
Satuba	77 910,00	114 828,42
Santa Luzia do Norte	46 699,00	108 731,64

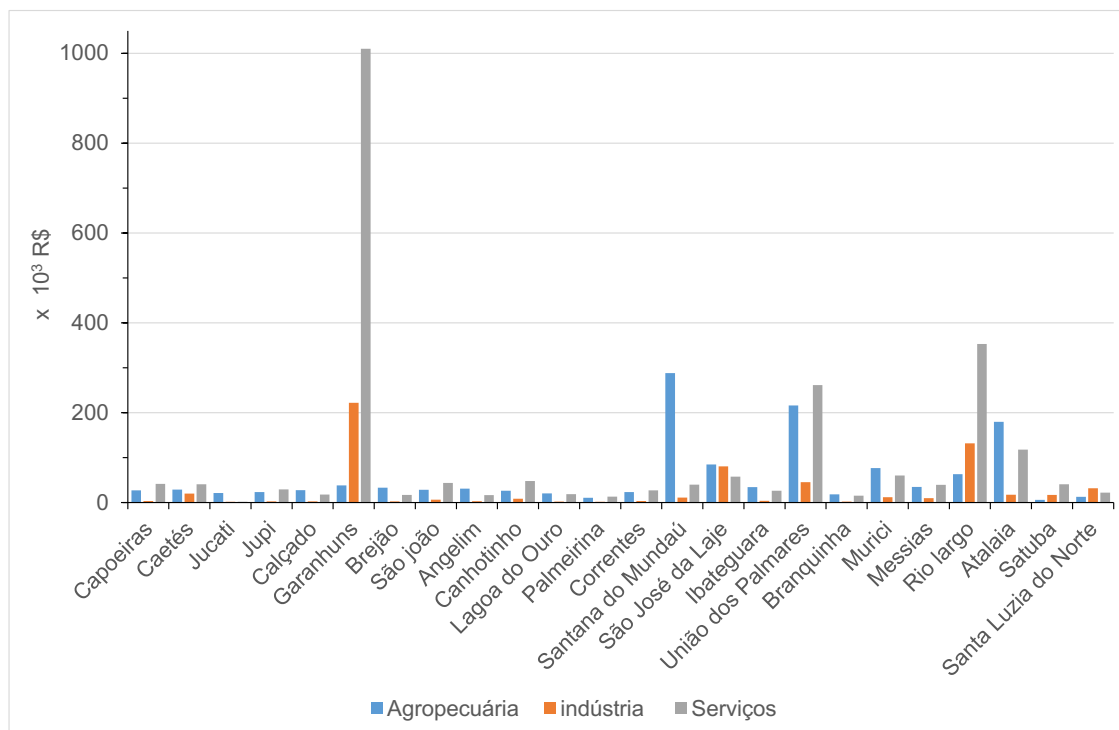


Figura 2.36 – Produto Interno Bruto (PIB) em 2015 nos setores de produção - agropecuário, indústria e de serviços -nos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

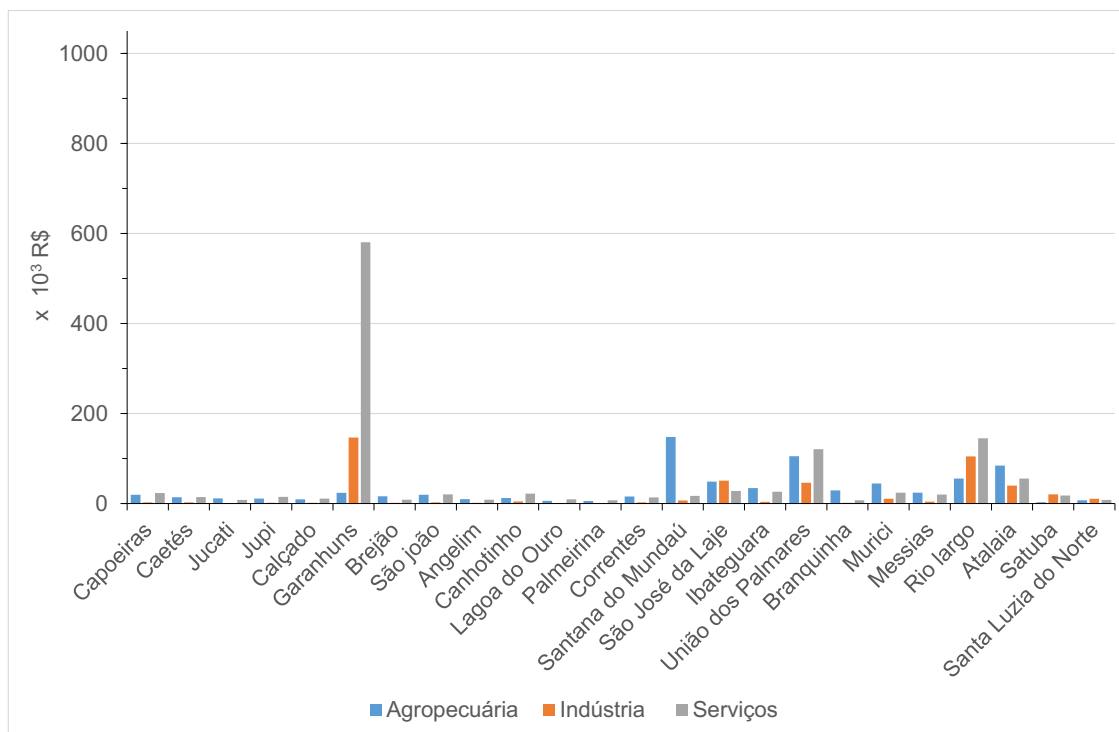


Figura 2.37 – Produto Interno Bruto – PIB dos setores: da agropecuária, da indústria e dos serviços correspondente ao ano de 2010 dos municípios situados na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

2.8 Caracterização da ocupação do Solo

No que se refere às atividades que influenciaram o uso do solo, de acordo com Lima (2008), no período de 1975 até 1989 iniciou-se no Brasil o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), aplicado ao complexo agroindustrial brasileiro, que incentivou a expansão da cultura da cana-de-açúcar. Esse processo trouxe sérias alterações ambientais à medida que as áreas de florestas foram sistematicamente substituídas pelo plantio da cana-de-açúcar para a produção de álcool.

Nesse sentido, destaca que a bacia hidrográfica do rio Mundaú tem sofrido pressões ambientais com a implantação das indústrias de produção de açúcar e álcool (Seplan, 1994). O ciclo da cana-de-açúcar imprimiu sérias mudanças à vegetação da bacia, as florestas foram sistematicamente substituídas por cultivo da cana e pastagem, *inclusive* nas áreas de vertentes e de matas ciliares; somado

a isso tudo, houve a ocupação desordenada do território que levou à ocupação urbana nas planícies fluviais.

Com o objetivo de conhecer a ocupação do solo no território e respetiva evolução, realizou-se a sua caracterização. A cartografia da ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Mundaú torna-se de grande importância para identificar as alterações ambientais e as mudanças do uso do solo que vêm ocorrendo ao longo dos anos, decorrentes essencialmente das ações antrópicas.

Foi decorrente da ausência da cartografia do uso do solo da bacia hidrográfica do rio Mundaú que se realizou a classificação das imagens de satélite LandSat TM5, pois os órgãos gestores da bacia hidrográfica não desenvolveram ações de elaboração da cartografia do uso do solo, o que justifica a ausência desta informação.

A caracterização da ocupação do solo e a análise da sua evolução tiveram como base a cartografia obtida a partir da classificação de imagens Landsat *Thematic Mapper* (TM) 5, disponível pela NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), referente aos anos 1990 e 2010/2011. A comparação da evolução do uso do solo pelas classificações das imagens Landsat TM5 foi feita de forma diferenciada para dois setores da bacia hidrográfica: 1990 e 2010 para o setor superior; e 1990 e 2011, para o setor inferior.

A cartografia do uso do solo da bacia hidrográfica foi elaborada através de classificações supervisionadas, referentes aos anos 2011, no setor inferior/intermédio, e 2010, no setor montante da bacia hidrográfica e finalizada através do processo de reclassificação, união e criação do mosaico das classificações provenientes das imagens de satélites Landsat Tm 5.

Recorreu-se a imagens Landsat TM5 por serem multiespectrais e possibilitarem o realce dos alvos nas imagens por composição falsa cor, o que facilita o processo de classificação; as cenas das imagens Landsat TM5 cobrem grande parte da área da bacia hidrográfica e são representativas à escala regional. Além disso, as

imagens de satélite utilizadas são livres de coberturas de nuvens e disponibilizadas gratuitamente.

2.8.1 Metodologia de elaboração da cartografia de ocupação do solo

Foi cartografada a ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú, a fim de obter a caracterização do uso do solo nos anos 1990 e 2010/2011; e por comparação constatar as mudanças ambientais associadas à evolução do uso e ocupação do solo ao longo destes 20 anos (Quadro 2.34).

Quadro 2.34 – Caracterização das imagens das imagens de satélite LandsatTM5, utilizadas no processo de classificação supervisionada.

Satélite	Banda	Faixa espectral	Re (m)	Órbita /ponto	Data
Landsat TM 5	TM3, TM4 e TM5	3 (visível)	30	214/066	18/03/2011
		4 (infravermelho próximo)		214/067	18/03/2011
				215/066	29/09/2010
		5 (infravermelho médio)		215/066	11/06/1990
				214/067	14/03/1990

Re - Resolução espacial.

A escolha das imagens LandSat TM 5 teve como critério a menor presença de cobertura de nuvens, visto que na área de estudo há nebulosidade quase constante e isto dificulta a utilização destas imagens. Por este critério, selecionaram-se apenas as imagens do setor superior e inferior da bacia hidrográfica referentes aos anos de 1990 que serviram de comparação da evolução do uso do solo apenas para o setor montante (215/066) e jusante (214/067). As imagens referentes aos anos 2010/2011 foram as únicas com datas próximas e livres de cobertura de nuvens que permitiram utilizá-las na classificação supervisionada e elaboração da cartografia do uso do solo para toda superfície da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

No entanto, as imagens Landsat TM5 de 1990 (ou de anos próximos) correspondentes ao setor intermédio da bacia hidrográfica (órbitas e pontos 214/066) apresentam significativas coberturas de nuvens, o que inviabilizou a sua utilização no processo de classificação supervisionada e, consequentemente, a construção da cartografia do uso do solo para toda superfície da bacia hidrográfica para o ano 1990.

O critério para a seleção das bandas das imagens Landsat TM 5 foi de acordo com aquelas que oferecessem maior distinção entre os alvos de uso do solo; sendo assim, utilizou-se as bandas TM3, TM4 e TM5 que correspondem ao visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, respectivamente. Estas bandas apresentam contrastes entre as áreas urbanas e áreas com vegetação (Banda 3); os corpos d'água são bem definidos e permite a identificação de áreas agrícolas (banda 4); identifica a umidade das plantas (banda 5). Foram essas bandas na faixa espectral do visível, infravermelho próximo e médio utilizadas para cartografar o uso solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú. Segundo Hoffer (1978), na região do espectro eletromagnético do visível a reflexão da energia solar pela planta é maior; na região do infravermelho a absorção é muito baixa e a refletância pode chegar a 50 % no sensor Landsat TM 5 (Tucker & Garratt, 1997) o que justifica a utilização das bandas TM3, TM4 e TM5 que correspondem à região do vermelho, infravermelho próximo e médio, respectivamente (Moreira, 2011).

Com a definição das bandas espectrais para utilização no processo de classificações supervisionada foi realizado o pré-processamento das imagens orbitais, que teve como início a correção atmosférica que levou ao melhoramento da nitidez das imagens orbitais. Segundo Song *et al.* (2001), através do espalhamento, os aerossóis na atmosfera aumentam a refletância e os alvos aparecem escuros, reduz o brilho e resulta em perda de informação nas imagens de satélites.

Após a correção atmosférica, foram realizados recortes espaciais pela bacia hidrográfica do rio Mundaú, e fez-se a composição das bandas 3, 4 e 5 e, em

seguida, foi criado o mosaico das imagens para o ano 2011 (órbita e ponto 214/066 e 215/067). Em relação às imagens da órbita/ponto 215/066 ano 2010, foram processadas separadamente por haver diferenças na composição quando comparadas com as imagens de 2011 (órbita/ponto 214/066 e 215/067) (Figura 2.38).

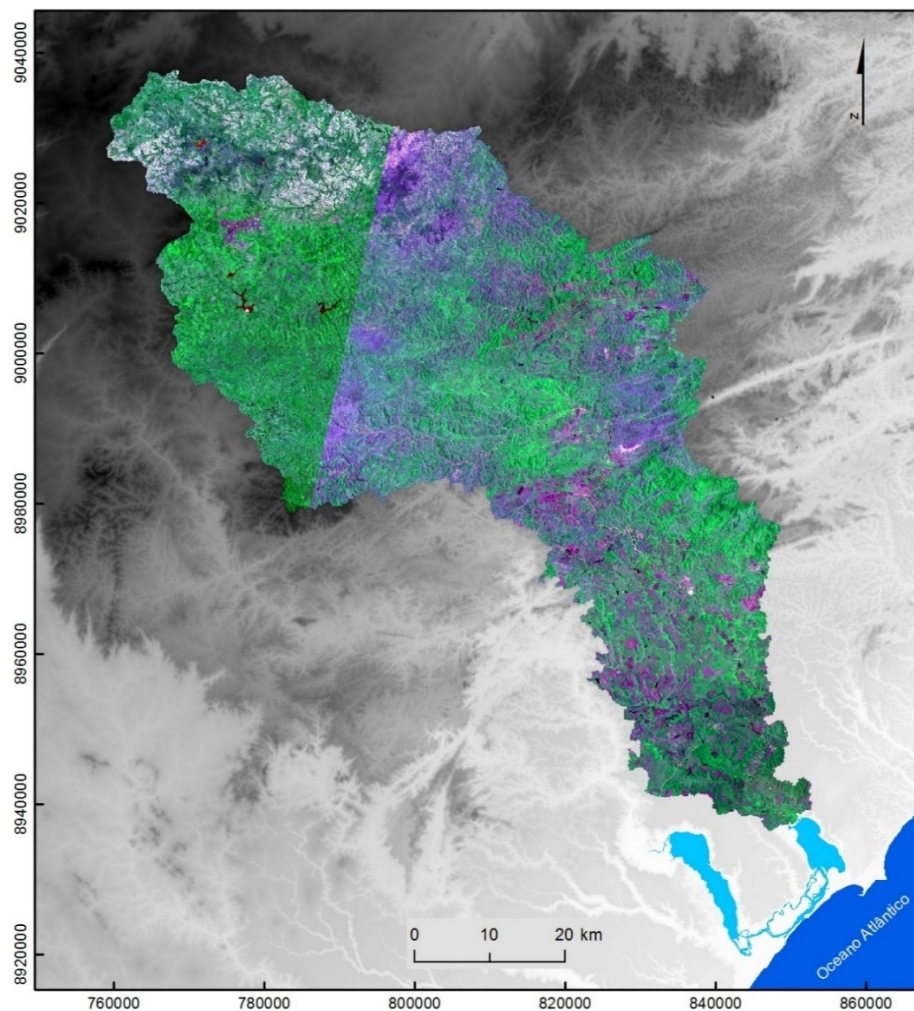


Figura 2.38 – Recortes das imagens Landsat TM 5, composições das bandas TM3, TM4 e TM5 capturadas em 29/09/2010 e órbita e ponto (215/066) correspondentes ao setor superior; e mosaico (união) das imagens capturadas em 18/03/2011 e órbita e ponto (21466/67) referente ao setor intermédio e jusante da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Com a conclusão do pré-processamento, e os recortes espaciais das imagens LandSat TM5, procedeu-se à composição em falsa cor, com as bandas TM3, TM4 e TM5 e a criação das áreas de treino (amostras) para a processo de classificação supervisionada através do algoritmo de classificação Máxima Verossimilhança (*Maximum likelihood*). O procedimento de amostragem foi feito não somente pelos contrastes das cores das imagens, mas também com o apoio das imagens de alta resolução *DigitalGlobe* para a identificação dos alvos de uso do solo, através de um Sistema de informação Geográfica.

Quanto aos procedimentos aplicados na classificação, as tonalidades das imagens Landsat TM 5 foram a principal condição de dificuldade na distinção das categorias de uso e ocupação do solo no processo de classificação supervisionada; exemplo disso foi a diferenciação das classes de pasto das classes de cultivo agrícola da cana-de-açúcar, o que levou a que fossem incluídas numa única classe de uso e ocupação do solo.

Também houve dificuldades na diferenciação entre áreas urbanas e solos expostos; essas situações foram constatadas com as similaridades das tonalidades das imagens multiespectrais. No entanto, as áreas de florestas ombrófilas e estacionais semideciduais, os campos húmidos e, principalmente, os corpos d'água, apresentaram respostas espectrais que possibilitaram a identificação dessas classes de uso do solo no processo de classificação supervisionada, pois foram alvos com contrastes nas tonalidades das cores na composição falsa cor.

Após a realização dos processos de classificação supervisionada das imagens Landsat TM5, foi realizada a validação através da análise de concordância do valor de exatidão global e do índice Kappa (Quadro 2.35), com o objetivo de obter a acurácia das classificações supervisionadas.

O índice kappa foi utilizado como método de validação dos mapas de ocupação do solo, onde foram extraídas as amostras dos alvos nas imagens de satélites LandSat TM 5; adicionalmente, foram utilizadas imagens de alta resolução

disponíveis no *ArcGIS Online Basemap* (ArcMap 10.2) como apoio ao processo de amostragem.

Com a extração das amostras, foi gerada a matriz de confusão, ou de erro, a partir do cruzamento entre as amostras dos alvos da ocupação do solo e da classificação da ocupação do solo.

Quadro 2.35 – Escala de avaliação dos valores do índice Kappa.

Índice Kappa	Qualidade
<0,00	Péssima
0,00 - 0,20	Ruim
0,21 - 0,40	Razoável
0,41 - 0,60	Boa
0,61 - 0,80	Muito boa
0,81 - 1,00	Excelente

Fonte: Landis, 1977.

O índice Kappa (K) utiliza na realização dos cálculos todos os valores da matriz de confusão assim como os elementos que estão fora da diagonal principal da matriz. Em seguida, também foram calculados índices e medidas derivados da matriz de confusão, o valor global, que leva em consideração os valores da diagonal principal da matriz, que é calculado pela soma e dividido pelo total de amostras. O valor de exatidão global utiliza apenas os elementos da diagonal principal da matriz de confusão (Congalton, 1991).

O resultado da acurácia das classificações pelos índices Kappa e o valor de exatidão global das classificações supervisionada derivada das imagens Landsat TM5 representativas da cartografia do uso do solo da bacia hidrográfica do rio Mundaú é apresentado no Quadro 2.36.

Quadro 2.36 – Índice Kappa e Valor Global (*overall*) derivado da matriz de confusão, para a verificação da acurácia das classificações das imagens Landsat TM 5.

Classificação	Kappa	Overall	Órbita/ponto
2010/2011	0,88	0,89	214/066, 215/067 e 215/066
1990	0,87	0,89	215/066
1990	0,81	0,85	214/066

Os valores obtidos do índice kappa tiveram concordância do tipo excelente, assim como o valor de exatidão global alcançou acentuada concordância entre as amostras da classificação final do uso e ocupação do solo. O valor máximo do índice Kappa foi de 0,88 de concordância e o valor de exatidão global foi ligeiramente maior (0,89) para o mapa de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Para o recorte correspondente à órbita e ponto 214/066 do ano 1990, correspondente ao setor inferior da bacia, obtiveram valores mínimos do índice kappa de 0,81 e o de exatidão global 0,85.

De maneira geral, todas as classificações derivadas das imagens de satélites obtidas a partir do algoritmo Máxima Verossimilhança (*Maximum likelihood*) tiveram excelente concordância, seja através do índice kappa ou através do valor de exatidão global.

2.8.2 Resultados da classificação da ocupação do solo nos anos 2010 e 2011

As classificações das imagens de satélite Landsat TM 5 resultaram na identificação de 9 classes predominantes de ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú nos anos 2010/2011 (Figura 2.39).

O resultado final da classificação das imagens Landsat TM 5 foi obtido de acordo com os polígonos de áreas de treino nas classes do predomínio da ocupação do solo seguintes:

- i) “Solos expostos” são áreas ocupadas por pastagem com solo desprovido de vegetação e áreas onde a cana-de-açúcar foi colhida; caracteriza-se por uma área sem cobertura vegetal;
- ii) as “Áreas urbanas” são constituídas por toda a área construída, sem distinção entre os diferentes tipos de habitação;
- iii) fragmentos de florestas mista composta por “Formações de floresta estacional semidecidual”, presença da formação submontana no setor intermédio e de montana no setor montante; estas formações vegetais são constituídas por fanerófitos com gemas foliares protegidas da seca por escamas (catáfilos ou pelos);
- iv) “Agrícola e Pasto” áreas em sua maioria destinadas ao pasto para a criação de animais e são constituídas por pequenas propriedades agrícolas;
- v) “Florestas ombrófilas densas”, de mata atlântica tropical, compõem as florestas de terras baixas e de formação submontana e formação florestal que apresentam faneróforos com altura aproximadamente uniforme. A submata é integrada por plântulas de regeneração natural, poucos nanofanerófitos e caméfitos além da presença de palmeiras de pequeno porte e lianas herbáceas em maior quantidade (IBGE, 2012);
- vi) “Cana-de-açúcar e pasto” são ocupadas, em sua grande maioria, pela atividade de produção da cana-de-açúcar e por pasto destinado à criação de animais, composto de vegetação rasteira herbácea;
- vii) “Cana-de-açúcar e solo exposto” compreendem as áreas no período de cana-de-açúcar colhida e solo exposto e desprovido de vegetação; são culturas agrícolas espaçadas, e estradas sem pavimentação e caminhos, que se enquadraram na mesma classe pois não foi possível fazer a separação;

viii) áreas de “Terrenos húmidos”, constituídas de vegetação de pequeno porte situada nos fundos dos vales, sob influência da dinâmica fluvial superficial e da variação do nível do lençol freático;

ix) “Corpos d’água” são áreas formadas por lagos naturais, e lagos formados pelo represamento dos rios por barramentos, assim como troços mais largos dos rios principais.

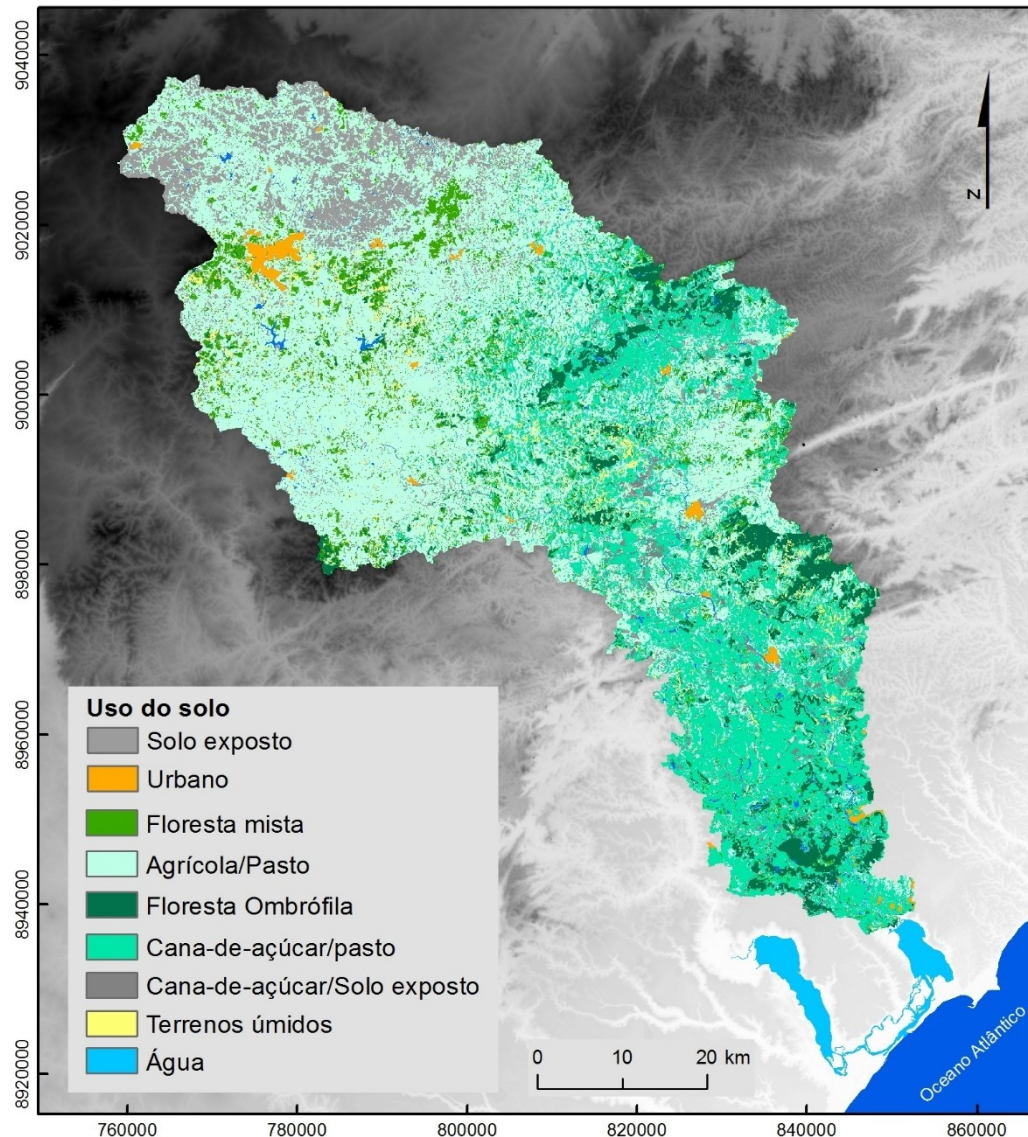


Figura 2.39 – Ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú (período 29/09/2010 e 18/03/2011).

O uso do solo mostrou predomínio de terras agrícolas e de pasto, com praticamente metade (47,6 %) da área da bacia hidrográfica; as áreas de cultivo da cana-de-açúcar ocupam aproximadamente 1000 km² (24,3 %); estas duas classes em conjunto ocupam, quase 72 % da bacia hidrográfica. O solo sem cobertura, a floresta mista e a floresta ombrófila têm frequências equivalentes e ocupam, em conjunto, 21,5 % da bacia hidrográfica, sendo que a restante área (6,5 %) se reparte pelas 4 classes menos representadas (Quadro 2.37; Figura 2.40).

Quadro 2.37– Frequência das classes de ocupação do solo (setembro 2010; março 2011) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Classes	Área (km ²)	Área (%)
U1	Solo exposto	332,2	8,1
U2	Urbano	37,3	0,9
U3	Floresta mista	267,3	6,5
U4	Agrícola/Pasto	1953,9	47,6
U5	Floresta Ombrófila	284,2	6,9
U6	Cana-de-açúcar/pasto	997,9	24,3
U7	Cana-de-açúcar/Solo exposto	87,1	2,1
U8	Terrenos húmidos	109,6	2,7
U9	Água	31,8	0,8

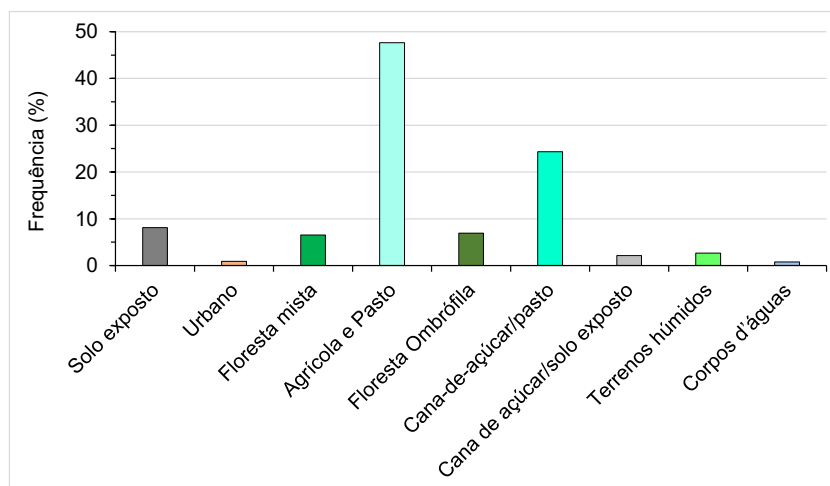
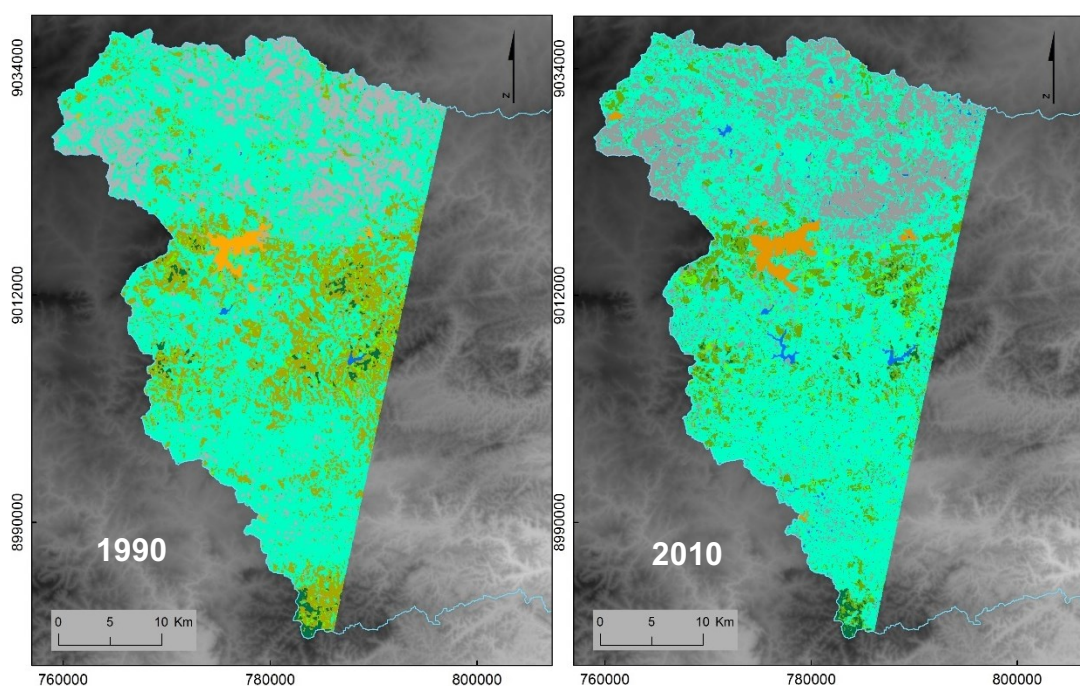


Figura 2.40 – Frequência relativa (%) das classes de ocupação do solo (setembro 2010; março 2011) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

2.8.2.1 Alterações da ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú

A partir da classificação das imagens Landsat TM 5 (2010/2011) realizou-se a comparação entre os anos 1990 e 2010, com o objetivo de conhecer a evolução da ocupação do solo no setor superior da bacia hidrográfica (Figura 2.41).



Ocupação do solo



Figura 2.41 – Ocupação do solo em 11/06/1990 e em 29/09/2010, para o setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, a partir das imagens Landsat TM 5.

A distribuição espacial das classes de ocupação do solo em 1990 e 2010, mostra que as áreas de solos expostos já apresentavam frequência expressiva em 1990 e tiveram um incremento de quase 42,2 %. Quanto às áreas urbanas, o aumento também foi significativo, pois cresceram de 14,8 para 21,9 km² e as áreas agrícolas/pasto já eram predominantes neste setor da bacia hidrográfica (Quadro 2.38; Figura 2.42), e foi constatado, 20 anos depois, o aumento em 4,2 % nesta classe.

Quadro 2.38 – Frequência das classes de ocupação do solo em 1990 e em 2010 no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Classes de ocupação do solo	Área em 1990		Área em 2010		Diferença 2010-1990 (%)
	km ²	%	km ²	%	
Solo exposto	188,5	15,32	268,1	21,8	6,5
Urbano	14,8	1,21	21,9	1,8	0,6
Agrícola/Pasto	749,6	60,94	780,9	63,5	2,56
Florestas mista	227,4	18,5	110,0	8,9	-9,6
Floresta Ombrófila	15,1	1,2	10,4	0,8	-0,4
Terrenos húmidos	32,5	2,6	25,8	2,1	-0,5
Água	2,2	0,2	13,8	1,1	0,9

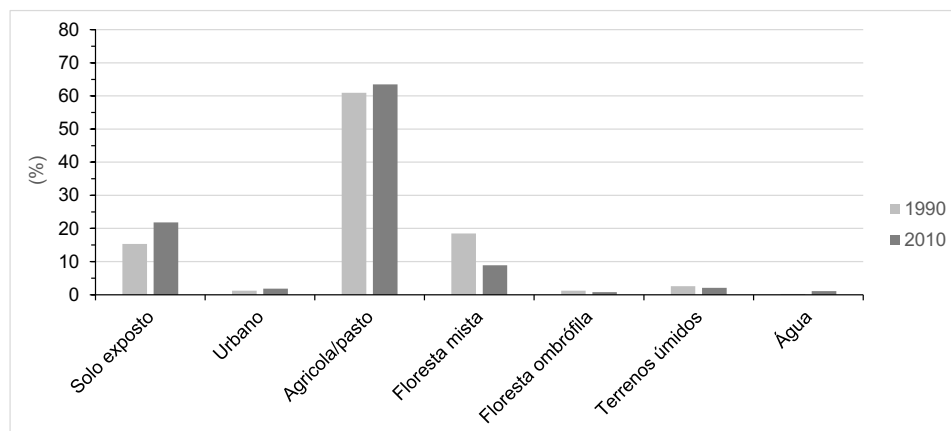


Figura 2.42 – Frequência relativa (%) das classes de ocupação do solo em junho de 1990 e setembro de 2010, no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Pelo contrário, as áreas de fragmentos de florestas (mista) estacionais semidecíduais sofreram reduções pela metade (51 %) de 227,4 para 110,0 km², assim como as áreas de florestas ombrófilas diminuíram 31,1 %, e passaram de 15,1 para 10,4 km². Como também as áreas de terrenos húmidos que diminuíram de 32,5 para 25,8 km² (Quadro 2.38 e Figura 2.42) e, no entanto, as áreas aquáticas aumentaram de 2,2 para 13,8 km².

Quanto à evolução das mudanças do uso e ocupação do solo no setor inferior da bacia hidrográfica (Figura 2.43 e 2.44) de 1990 a 2011, constatou-se o predomínio da cultura-de-cana e pasto, e o seu incremento de 562,43 km² para 597,05 km² em 2011 (aumento de 6,15 %).

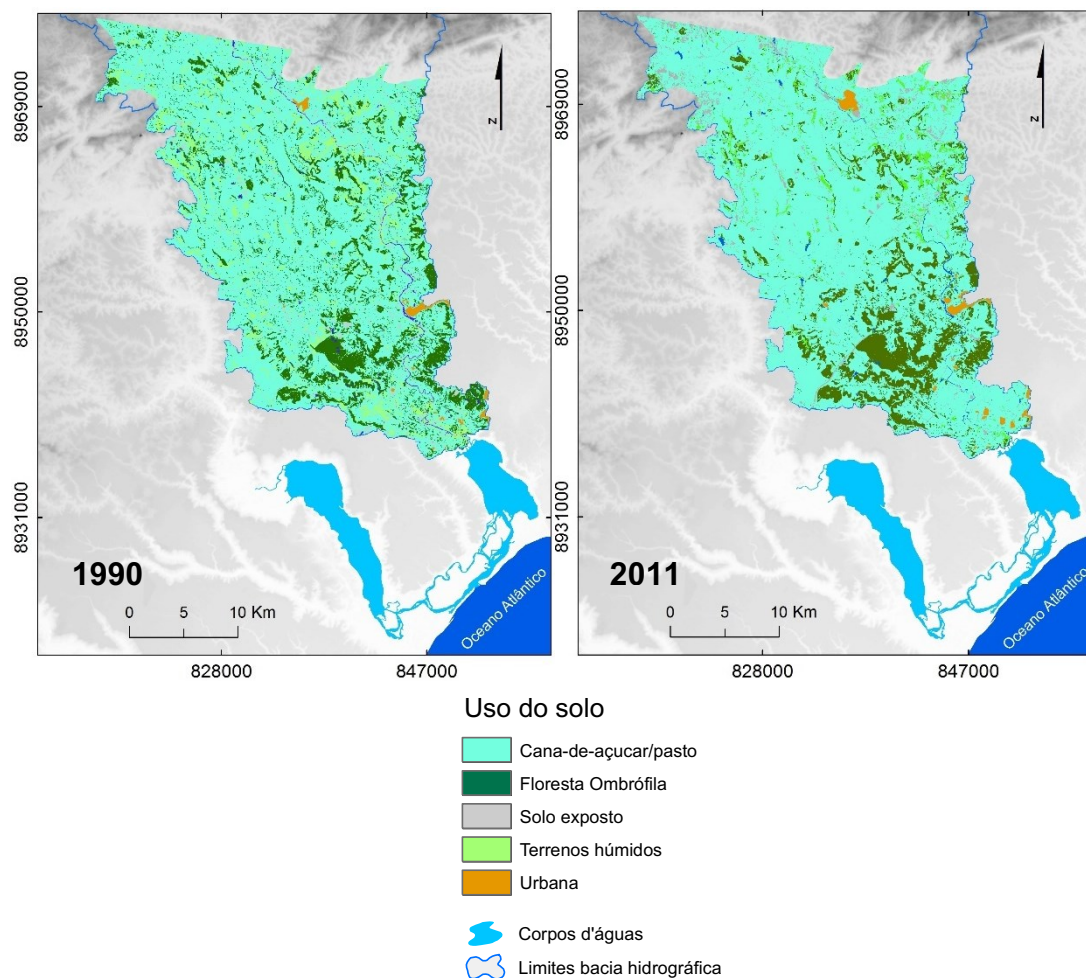


Figura 2.43 – Ocupação do solo em 14/03/1990 e de 18/03/2011, para o setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, a partir das imagens Landsat TM 5.

No entanto, as áreas de florestas ombrófilas tiveram reduções de aproximadamente 2 %, diminuíram de 109,61 para 107,55 km²; as áreas de solo exposto aumentaram cerca de 50 %, de 22,06 km² para 33,65 km²; as classes de terrenos húmidos diminuíram de 70,41 km² para 16,33 km²; as áreas urbanas aumentaram em 80 %, de 3,98 para 7,15 km². E as áreas de corpos d'água representadas pelos rios, lagos e reservatórios aumentaram de 5,71 km² para 12,45 km² (Quadro 2.39 e Figura 2.44).

Quadro 2.39 – Classes de uso e ocupação do solo entre o período de março de 1990 e 2011 em termos percentuais do setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Classes de uso e ocupação do solo	Área em		Área		Diferença 2010-1990 (%)
	Área km ²	%	Área km ²	%	
Cana-de-açúcar/ Pasto	562,43	72,65	597,05	77,12	4,47
Floresta ombrófila	109,61	14,16	107,55	13,9	-0,26
Solo exposto	22,06	2,85	33,61	4,34	1,49
Terrenos húmidos	70,42	9,1	16,35	2,1	-6,99
Urbano	3,98	0,51	7,17	0,93	0,42
Água	5,71	0,74	12,47	1,61	-0,87

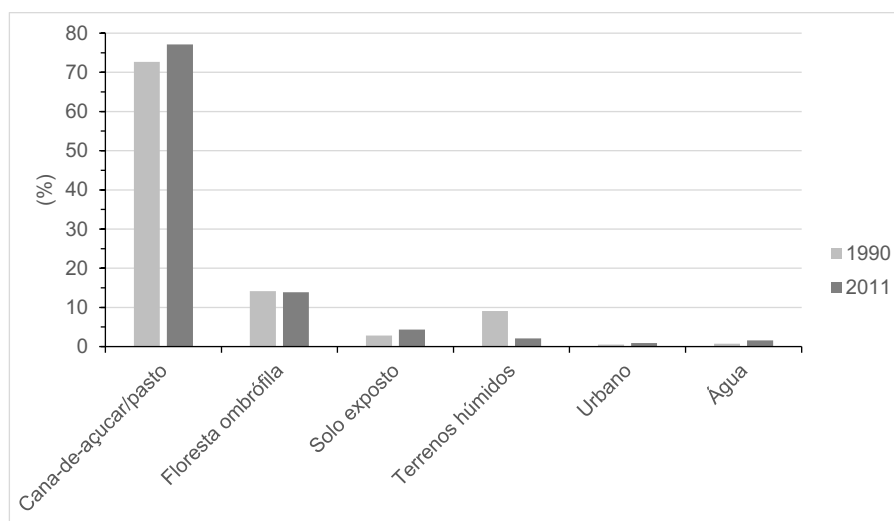


Figura 2.44 – Frequência relativa (%) das classes de ocupação do solo em junho de 1990 e setembro de 2011, no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

No setor montante da bacia hidrográfica, o uso agrícola é intensivo com o predomínio das pequenas propriedades rurais, destinadas essencialmente ao cultivo do feijão e da mandioca, como também a atividade da pecuária extensiva. Observou-se em sua hidrografia significativa quantidade de lagos e reservatórios distribuído espacialmente em todo este setor de montante, destinado ao abastecimento humano e atividades agrícolas/pecuária.

No que se refere à vegetação, as florestas subperenifólia e subcaducifólias apresentaram apenas fragmentos. Além disso, as áreas de solo exposto foram predominantes no setor de cabeceira da bacia hidrográfica e estão associadas tanto a atividades de cultivo agrícola, onde o solo fica desprotegido, como também decorrente da atividade da pecuária extensiva, a qual pode ter contribuído significativamente para a alteração da vegetação local e/ou pelo pisoteio dos animais e área destinada ao pasto; as estradas e caminhos também são situações que contribuem para aumento das áreas de solo exposto neste setor da bacia hidrográfica.

Os terrenos húmidos mostraram pouca expressividade espacial, de acordo com o resultado da classificação supervisionada.

As áreas urbanas também apresentaram pouca expressividade espacial, mas a cidade de Garanhuns é a principal cidade polo situada no setor superior da bacia hidrográfica; ainda há de destacar o predomínio da ocupação das áreas urbanas em planícies fluviais próximas aos cursos dos rios.

Mas também, ao analisar o uso do solo no setor intermédio e inferior da bacia hidrográfica, pode-se observar os fragmentos de florestas ombrófilas, nos limites da bacia e em locais com altos declives. Nota-se o predomínio do uso do solo essencialmente agrícola/pasto com áreas desprovidas de vegetação em detrimento da cultura canavieira. Quanto às áreas urbanas, estão localizadas, em sua grande maioria, muito próximas aos cursos de água.

As alterações ambientais ocorrem ao longo dos cursos dos rios, com áreas desprovidas de matas ciliares que possuem importante função de manter estável as margens dos cursos d'água, que assim tornam as margens dos rios suscetíveis ao assoreamento com a acumulação de sedimentos no leito dos rios contribuindo para a diminuição da capacidade de drenagem das águas fluviais. Estas situações ambientais são divergentes quando confrontadas com o Código Florestal Brasileiro, o qual considera, no Art. 4.º, "Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei: I - as faixas marginais de

qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de: (Incluído pela Lei nº 12.727, de 2012) a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura; b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura”.

Há de destacar que as áreas de preservação permanentes, nos topos de morros, também têm sido ocupadas pelas culturas agrícolas. As atividades agrícolas da cana-de-açúcar, além de necessitarem do uso abundante da água, interferem na qualidade das águas dos rios, pois os defensivos (agrotóxicos ou pesticidas) e os fertilizantes agrícolas no solo são transportados para os corpos d'água por escoamento superficial da água. Essas culturas agrícolas são trabalhadas sem técnicas apropriadas de cultivo e de conservação dos solos, influenciando tanto na perda de nutrientes, como também para áreas suscetíveis a processos de erosão hídrica dos solos, comprometendo a fertilidade e causando a esterilização dos solos (Guerra *et al.*, 2009).

2.8.3 Síntese

A partir da comparação da evolução do uso do solo nos setores montante e jusante nos 20 anos, de 1990 a 2010/2011 se constata o processo intenso de antropização que se reflete nas condições ambientais da bacia hidrográfica. As atividades agrícolas e da pecuária trouxeram significativas modificações na bacia hidrográfica, entre as quais se pode observar a sistemática substituição das florestas pelas áreas de cultivo agrícola e do pasto, onde restam apenas fragmentos de florestas, sejam ombrófilas, ou estacionais semidecíduais situadas em alguns setores da bacia hidrográfica e, observa-se, também, áreas constituídas de vegetação do tipo herbáceas. Mesmo com as reduções, o setor jusante apresenta maior biomassa vegetal, que corresponde aos fragmentos de florestas

ombrófilas; no setor montante a diminuição das florestas é mais significativa no decorrer dos 20 anos.

Os usos do solo do tipo agrícola e do pasto são predominantes em ambos os setores (montante e jusante), o que associado ao aumento das áreas urbanas explicam a necessidade de demanda hídrica na bacia hidrográfica com a construção de reservatórios/barragens para abastecer as atividades agrícolas/pecuárias e humanas. Em ambos os setores da bacia hidrográfica as áreas urbanas, em grande parte, estão localizadas em leito de inundação fluvial tornando-se as pessoas vulneráveis aos perigos naturais.

Constam-se nos setores mencionados a supressão das florestas e consequentemente a diminuição dos terrenos húmidos principalmente no setor jusante. Com efeito, há impactos negativos no armazenamento de água no solo em planícies fluviais.

Evidentemente, há o aumento das áreas de solo exposto com mais expressividade no setor montante da bacia hidrográfica nas áreas ocupadas pelas pequenas propriedades agrícolas de cultivo de mandioca e feijão.

Consequentemente, todo processo de pressão antrópica na bacia hidrográfica se reflete de forma negativa nas condições ambientais e contribui na intensificação dos perigos naturais. A exemplo, a supressão das florestas diminuem a capacidade de interceptação e de infiltração da precipitação, que propiciam o aumento da circulação superficial e arraste de partículas do solo para os cursos de água, que se propaga e favorece o transporte e acumulação de carga sólida nos reservatórios/barragens e nos cursos de água; a ausência das matas ciliares torna as áreas ribeirinhas desprotegidas dos elevados caudais, principalmente nos leitos de inundação onde há concentração dos núcleos urbanos e presença de indústrias.

E nos setores de vertentes que sofreram a retirada da cobertura florestal e foram substituídas pelo pasto, quando saturados os solos pela precipitação tornam-se

susceptíveis a movimentos de massa e propiciam o carreamento de sedimentos para os fundos dos vales e cursos de água. Além disso, com a ausência de saneamento urbano, os efluentes domésticos têm o destino final *in situ* no leito do rio.

Portanto, as condições ambientais da bacia hidrográfica favorecem a intensificação dos fenômenos naturais perigosos de inundação fluvial, erosão hídrica dos solos e a ocorrência de movimento de massa em vertentes e intensificado pelas ações antrópicas. Assim, com o aumento dos núcleos urbanos ao longo dos cursos de água, nas áreas ribeirinhas, tornam-se ainda mais vulneráveis aos fenômenos naturais perigosos supracitados.

3. PERIGOS NATURAIS E TECNOLÓGICOS

Após a caracterização do meio físico, socioeconômico e da ocupação do solo, se apresenta neste capítulo a caracterização dos fenômenos naturais perigosos – erosão hídrica dos solos, movimentos de massa em de vertentes e inundações fluviais –, assim como uma breve abordagem aos perigos tecnológicos, temáticas base para a elaboração do modelo de integração e avaliação dos perigos múltiplos naturais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

3.1 Erosão hídrica dos solos

A erosão dos solos, a sua degradação e perdas, são condições que podem intensificar os perigos naturais em bacias hidrográficas, associadas ao transporte e acumulação de sedimentos nos canais de drenagem fluviais, em reservatórios (barragens), e à intensificação do transporte de carga sólida ao longo dos cursos d'água. Estas condições diminuem a capacidade de armazenamento de água por parte dos reservatórios; têm consequências negativas nas estruturas hidráulicas e podem intensificar a energia de transporte de massa sólida, aumentando o potencial erosivo e a perigosidade do escoamento em bacias hidrográficas.

Nesse sentido, foi calculada a erosão real e potencial do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú, pois existem ações antrópicas que contribuem para a intensificação deste processo em grandes áreas agrícolas, com solos expostos associados as condições naturais de predisposição a erosão hídrica.

Como método de avaliação utilizou-se a Equação Universal de Perda do Solo (EUPS) para o cálculo da suscetibilidade à erosão hídrica real e potencial anual média dos solos, desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978), modelo multiplicativo baseado no tratamento parcelar dos seis fatores representados pela equação 3.1.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3.1)$$

A é a perda de solo calculada por unidade de área (t/ha/ano);

R erosividade da chuva (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹);

K fator de erodibilidade (t h MJ⁻¹ mm⁻¹);

LS é o fator topográfico, onde o fator L representa o comprimento das vertentes e o fator S a declividade;

C é o fator que representa a cobertura do solo e P é o fator que representa práticas conservacionistas. Para tanto, os fatores da Equação Universal de Perda dos Solos são descritos a seguir.

3.1.1 Fator de Erosividade (R)

A erosividade se define pela capacidade que a precipitação e o escoamento superficial possuem para erodir a camada superficial do solo. Para avaliação do efeito da precipitação foram selecionadas 10 estações pluviométricas, distribuídas ao longo da bacia hidrográfica e com períodos em comum, de 1963 a 1989 (séries mensais de 27 anos).

O fator R representa a erosividade da chuva e foi obtido através do método utilizado por Lombardi Neto & Moldenhauer (1980):

$$EI = 67,355 (p^2/P)^{0,85} \quad (3.2)$$

onde EI é a média mensal do índice de erosão dos solos, em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹;

p^2 é precipitação mensal média, em mm;

P é a precipitação anual média, em mm.

Assim, o valor anual (R) foi obtido a partir da seguinte expressão (equação 3.3):

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI_{30i} \quad (3.3)$$

Posteriormente, foi calculada a correlação linear simples da erosividade com a altitude (Figura 3.1), representado pelo modelo de elevação SRTM (*Suttle Radar Topography Mission*). Assim, foi calculado o mapa de erosividade (R) que resultou da seguinte expressão:

$$R = -0,3042 \cdot \text{Altitude} + 642,17 \quad (3.4)$$

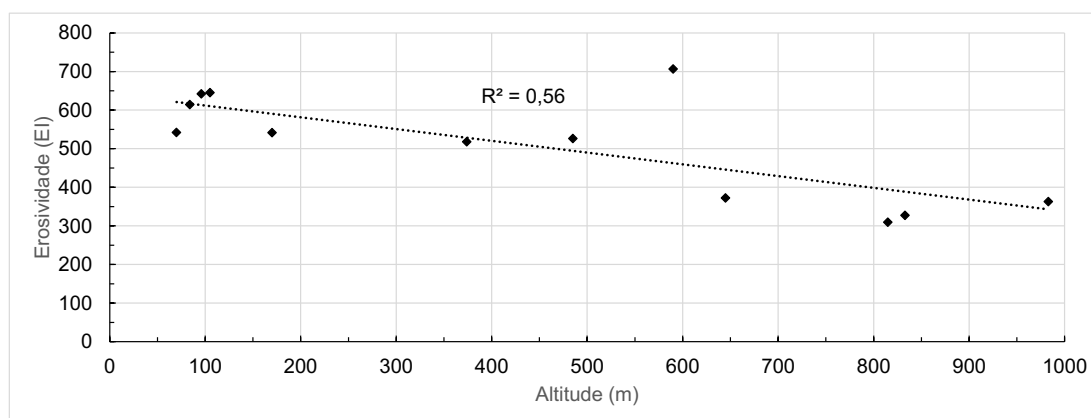


Figura 3.1 – Dispersão, tendência e coeficiente de determinação (R^2) entre a erosividade e altitude na bacia hidrográfica.

De acordo com os valores obtidos, a erosividade média das 10 estações na bacia hidrográfica é $509,1 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O valor máximo de erosividade é $706,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na estação Maceió, situada no setor jusante, e o mínimo $309,6$ na estação Jucati (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Valores de erosividade nas 10 estações pluviométricas, utilizados no cálculo da erosividade da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Estação Pluviométrica	Erosividade anual
CAETES	327,3
JUCATI	309,6
LAGEDO	372,4
GARANHUNS	363,1
CORRENTES	526,5
USINA SERRA GRANDE	518,2
UNIAO DOS PALMARES	541,5
MURICI	614,1
ATALAIA	542
MACEIO	642,2
Média	509,1

Os maiores valores de erosividade na bacia hidrográfica do rio Mundaú ocorrem nos setores intermédio e inferior, havendo o aumento no sentido de montante para jusante (Figura 3.2). A erosividade da bacia hidrográfica acompanha o gradiente da precipitação que diminui à medida que aumenta a altitude.

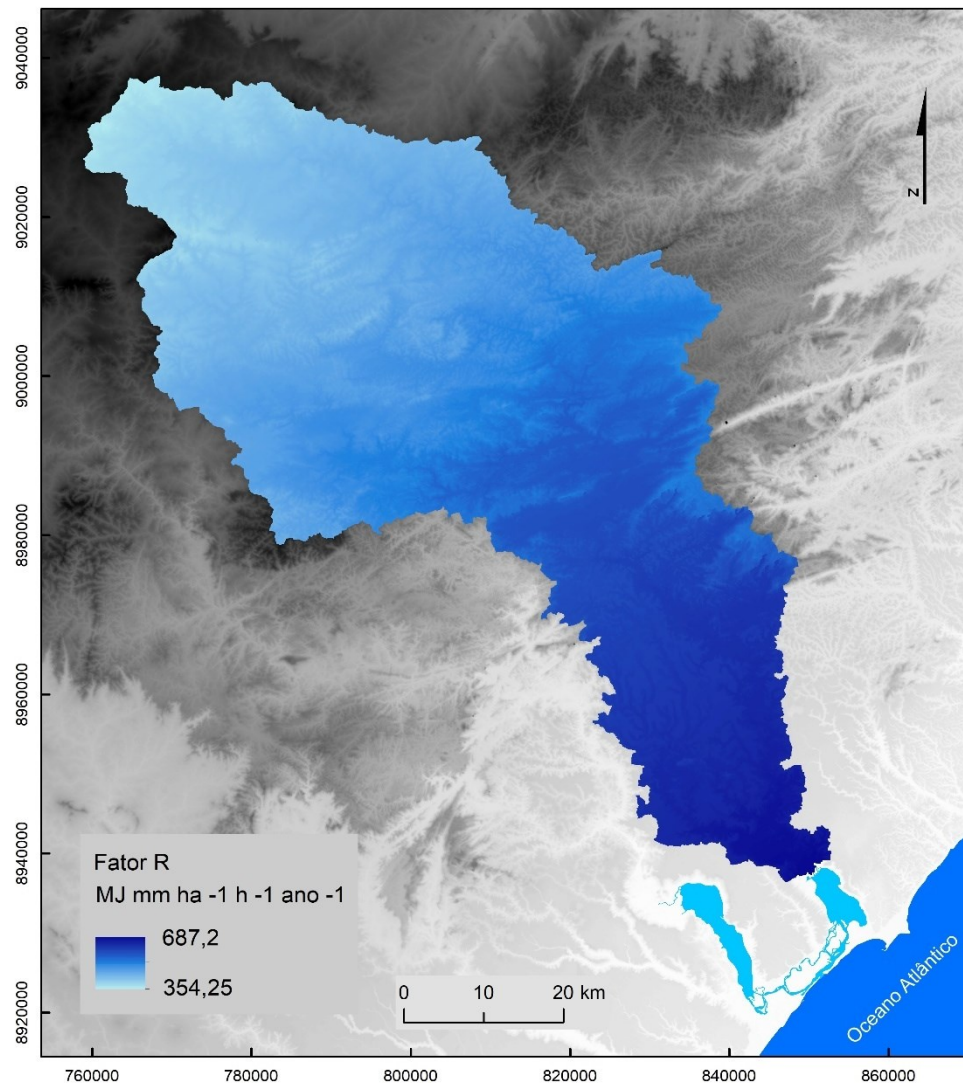


Figura 3.2 – Distribuição espacial da erosividade da precipitação ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

O gradiente de erosividade na bacia hidrográfica se intensifica no sentido inverso da elevação da altitude na bacia hidrográfica; isto foi constatado ao observar a correlação inversa entre as médias mensais de precipitação e a altitude das

estações pluviométricas (Cap. 2.6). À medida que aumenta a altitude diminui a erosividade.

3.1.2 Fator de Erodibilidade (K)

Diferentemente do impacto direto da precipitação no solo, o fator de erodibilidade avalia a capacidade do solo resistir ao arraste de suas partículas superficiais. Não havendo informação disponível para os solos específicos da bacia hidrográfica (Figura 2.9 do capítulo 2), o valor de K para cada solo resultou da média dos valores encontrados nos diferentes autores consultados na revisão de literatura (Costa *et al.*, 2009; Silva & Alvares, 2005; Chaves & Piau, 2008; Silva & Andrade, 1984; Mannige, 2002; Ribeiro & Alves, 2007; Vitte & Filho, 2006; Farinasso *et al.* 2006; Costa *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2009). Neste processo de pesquisa, os valores de K utilizados no cálculo da EUPS estão no sistema internacional (SI) (Quadro 3.2).

Quadro 3. 2– Classificação do fator de erodibilidade.

K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Classificação
$K \leq 0,015$	Fraca
$0,015 < K \leq 0,030$	Média
$K > 0,030$	Elevada

Carvalho (2008).

Em relação à distribuição espacial da erodibilidade, no setor montante e no interflúvio oeste da bacia hidrográfica apresentam-se os valores mais elevados de K , com 0,06 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, em áreas predominantes planas.

Nos setores intermédio e jusante distribui-se a erodibilidade de 0,04 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, correspondente a Neossolos Litólicos eutróficos, Neossolos Litólicos situados em vertentes com elevados declives e nos setores planos, Gleissolos háplicos no setor central da bacia hidrográfica e Neossolos flúvicos no setor inferior próximo à foz em planície fluvial. A classe de acumulação, que representa pequenas ilhas no

rio Mundaú apresentou o mesmo valor de erodibilidade da classe circundante de Gleissolos.

Os solos de erodibilidade $0,03 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ocupam cerca de 76,1% na bacia hidrográfica e estão situados em quase todos os setores, com exceção do extremo montante; são solos altamente suscetíveis a erosão hídrica laminar predominante na bacia hidrográfica, os latossolos e argissolos (Figura 3.3 e Quadro 3.3).

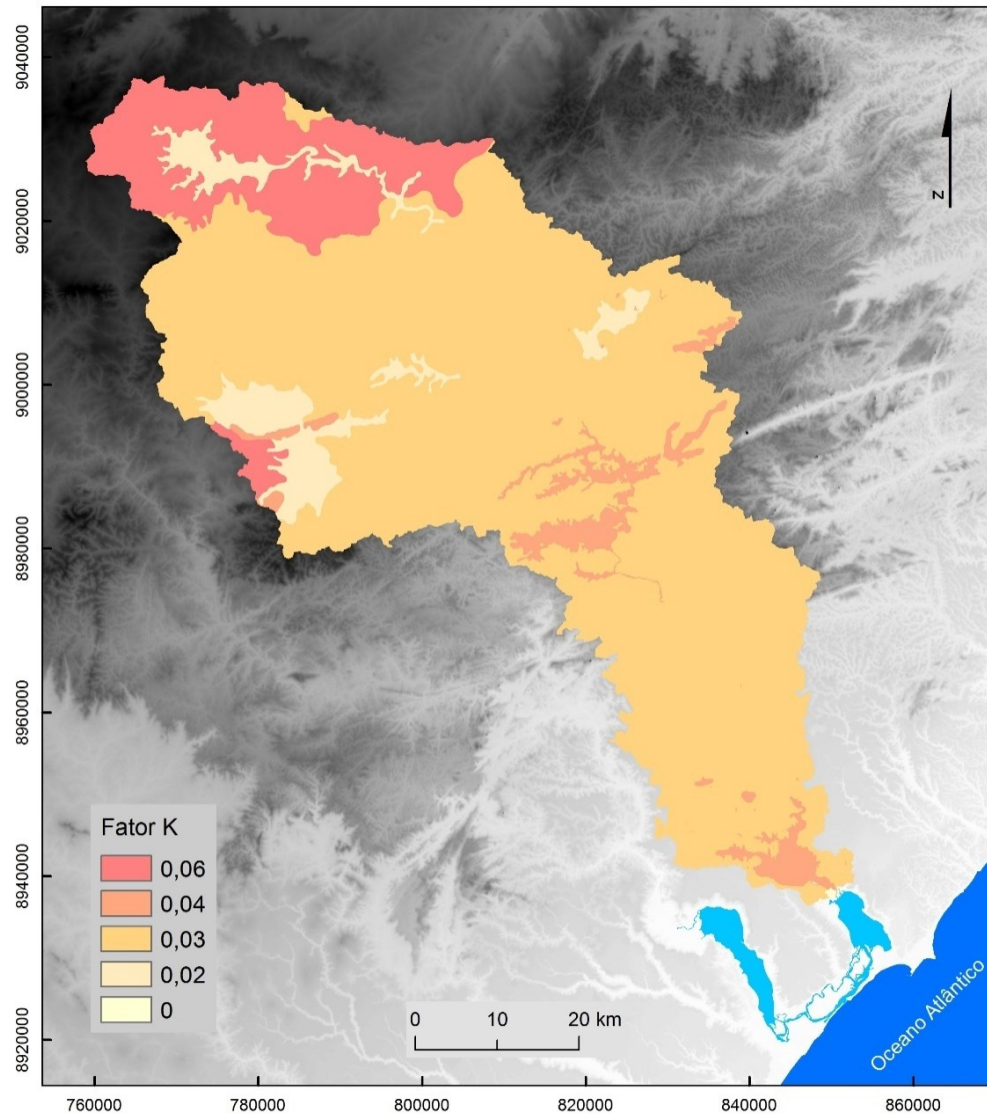


Figura 3.3 – Distribuição espacial da erodibilidade ($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

O valor de erodibilidade de $0,02 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ compreende parte dos setores superior e intermédio da bacia hidrográfica, com predomínio em setores planos e de acentuados declives no setor leste.

Apenas a classe dos solos de mangue obteve o valor nulo de erodibilidade, pois são solos saturados e encharcados, em áreas planas, que não sofrem erosão hídrica.

Quadro 3.3 – Fator de erodibilidade (K) dos solos da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Tipos de solos	Fator K
S1	Argissolos Vermelhos	0,03
S2	Argissolos Vermelho-Amarelos	0,03
S3	Argissolos Amarelo distróficos	0,03
S4	Gleissolos háplicos	0,04
S5	Latossolos Amarelos	0,03
S6	Latossolos Vermelho-Amarelos	0,02
S7	Neossolos Litólico eutróficos	0,04
S8	Neossolos Flúvicos	0,04
S9	Neossolos Quartzarenicos	0,03
S10	Neossolos regolíticos eutróficos (Regossolos)	0,06
S11	Neossolos Litólicos	0,04
S12	Planossolos Háplicos	0,03
S13	Planossolos Solódicos	0,02
S14	Solos de Mangue	0,0

Quadro 3.4 – Frequência dos valores do fator de erodibilidade (K) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Fator K	Área (km ²)	Área (%)
0,06	535,3	13,04
0,04	189,2	4,61
0,03	3120,7	76,06
0,02	256,7	6,25
0	1,3	0,03
Total	4103,2	100,0

Segundo se pode constatar, a erodibilidade média corresponde a 82,35 % da bacia hidrográfica e a erodibilidade é elevada a 17,65 %. Assim, a erodibilidade dos solos é predominante de média a elevada na bacia hidrográfica (Quadro 3.4).

3.1.3 Fatores de comprimento (L) e declividade das vertentes (S)

O fator LS é de grande importância na identificação das áreas com predisposição a erosão laminar dos solos. Ambos os fatores L e S foram calculados a partir do modelo digital de elevação SRTM, com 30 metros de resolução espacial (Figura 3.3). A extensão das vertentes foi obtida a partir do fluxo acumulado; ambos os parâmetros, extensão e declive das vertentes, foram calculados para cada célula de acordo com Wischmeier e Smith (1978) e McCool *et al.* (1987). Os fatores L e S foram integrados em SIG de acordo com Moore e Burch (1986) e Moore e Wilson (1992), segundo a expressão seguinte:

$$LS = \left(\frac{\text{Fluxo acumulado} \times \text{Resolução}}{22,13} \right)^{0,4} \times \left(\frac{\text{Seno(Declive)}}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (3.5)$$

em que “*Fluxo acumulado*” corresponde ao número de células acumuladas, de montante para jusante, ao longo da vertente; “*Resolução*” corresponde à dimensão das células da matriz (neste caso 30 m); e o Declive corresponde, nesta fórmula, a valores em radianos. Os resultados do fator LS foram classificados por desvio padrão (Quadro 3.5 e Figura 3.4).

Quadro 3.5 – Frequência das classes de valores do fator LS na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Classes	Área (km ²)	Área (%)
14,5 – 30,5	137,6	3,3
10 – 14,4	210,6	5,1
5,4 – 9,9	530	13
0,9 – 5,3	1301,	31,7
0 – 0,8	1923,7	46,8
Total	4103,2	100,0

A partir da equação 3.5 calculou-se os fatores LS que representam a influência do comprimento e declive da bacia hidrográfica; o valor mínimo é 0, o máximo 30,5 a média foi 3,8 e o desvio padrão 7,9.

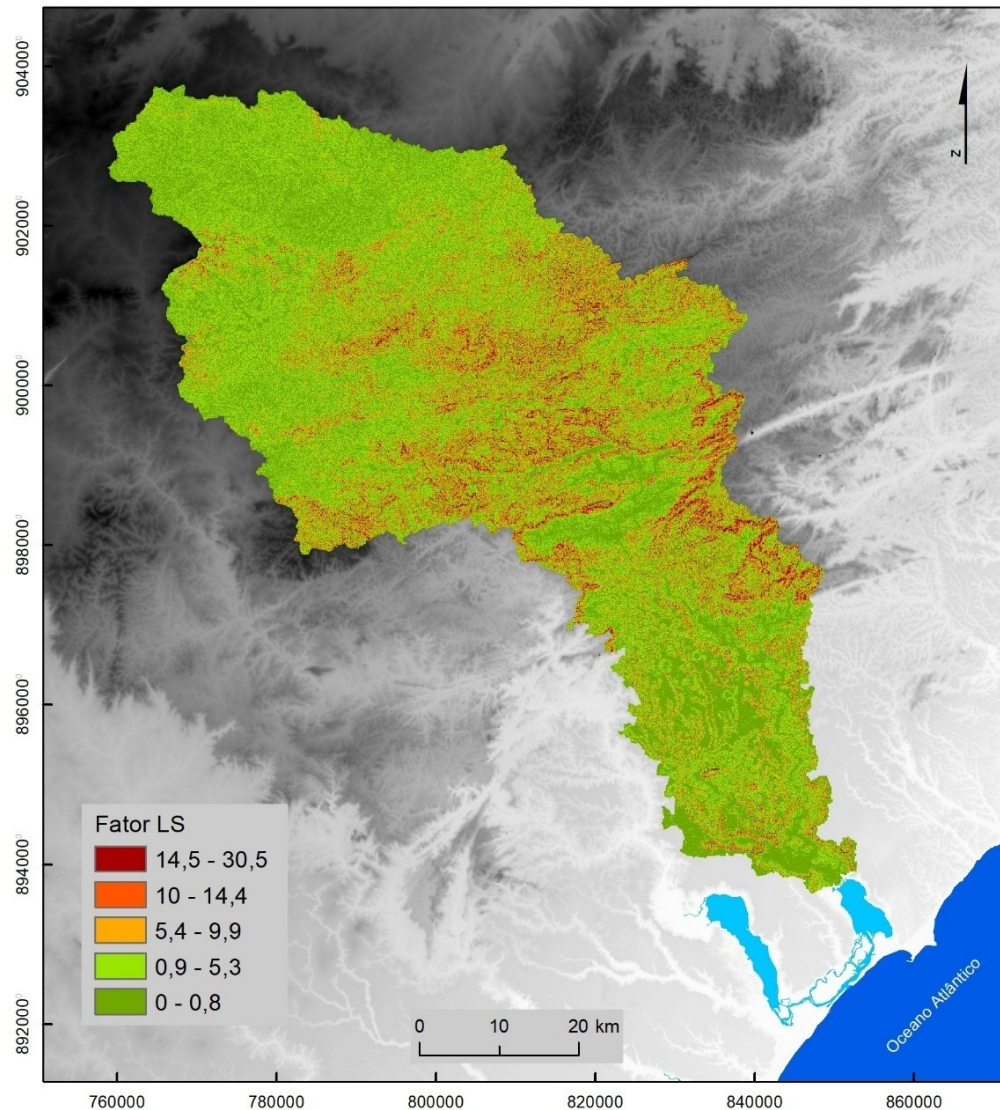


Figura 3.4 – Distribuição espacial do Fator LS (comprimento e declive das vertentes) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

A distribuição espacial das classes dos fatores de comprimento (L) e declive (S) das vertentes mostra que os valores baixos predominam na bacia hidrográfica. Os setores que obtiveram valores máximos de LS estão essencialmente no setor intermédio da bacia hidrográfica (Figura 3.4).

3.1.4 Fatores de cobertura do solo (C) e práticas agrícolas (P)

O fator C representa a proteção oferecida ao solo pelo coberto vegetal e é muito importante na diminuição da erosão hídrica dos solos. Os valores de C são a média dos valores de C obtidos na literatura que, posteriormente, foram atribuídos às 9 classes de uso do solo predominantes na bacia hidrográfica do rio Mundaú, obtidas da classificação das imagens de satélite Landsat 5 TM, para os anos 2010 e 2011.

Quanto ao fator P, foi atribuído o valor 1 a toda a bacia hidrográfica, por não terem sido identificadas práticas agrícolas conservacionistas significativas.

O maior valor de C atribuído foi 1 para o solo desprovido de vegetação, o que reflete a ausência de qualquer proteção do solo e ocupa 8 % da bacia hidrográfica; no extremo oposto, as classes que identificam corpos d'água, que incluem rios, reservatórios, lagos, terrenos húmidos, têm valor 0 (solo inexistente ou submerso); às áreas de florestas ombrófila e de florestas mistas foram atribuídos valores 0,002 e 0,001, respectivamente (Quadro 3.6).

Quadro 3.6 – Classes de ocupação do solo, respectivas áreas e valores atribuídos ao fator C.

Classes	Área (km ²)	Área (%)	Fator C
Solo exposto	332,5	8,1	1
Cana-de-açúcar/Solo exposto	86,7	2,1	0,59
Cana-de-açúcar	998,2	24,3	0,24
Agrícola/Pasto	1952,7	47,6	0,09
*Fragmento de florestas	267,4	6,5	0,010
Floresta Ombrófila	283,4	6,9	0,008
Urbano	37,3	0,9	0
Terrenos húmidos	109,7	2,7	0,0002
Água	35,3	0,9	0
Total	4103,1	100,0	---

*Floresta subcaducifólia/Hipoxerófila.

À classe agrícola/pastos, que ocupa quase 47,6 % da bacia hidrográfica, foi atribuído valor 0,09, e à classe cana-de-açúcar foi atribuído 0,24; em conjunto, estas duas classes ocupam quase 72 % da bacia hidrográfica.

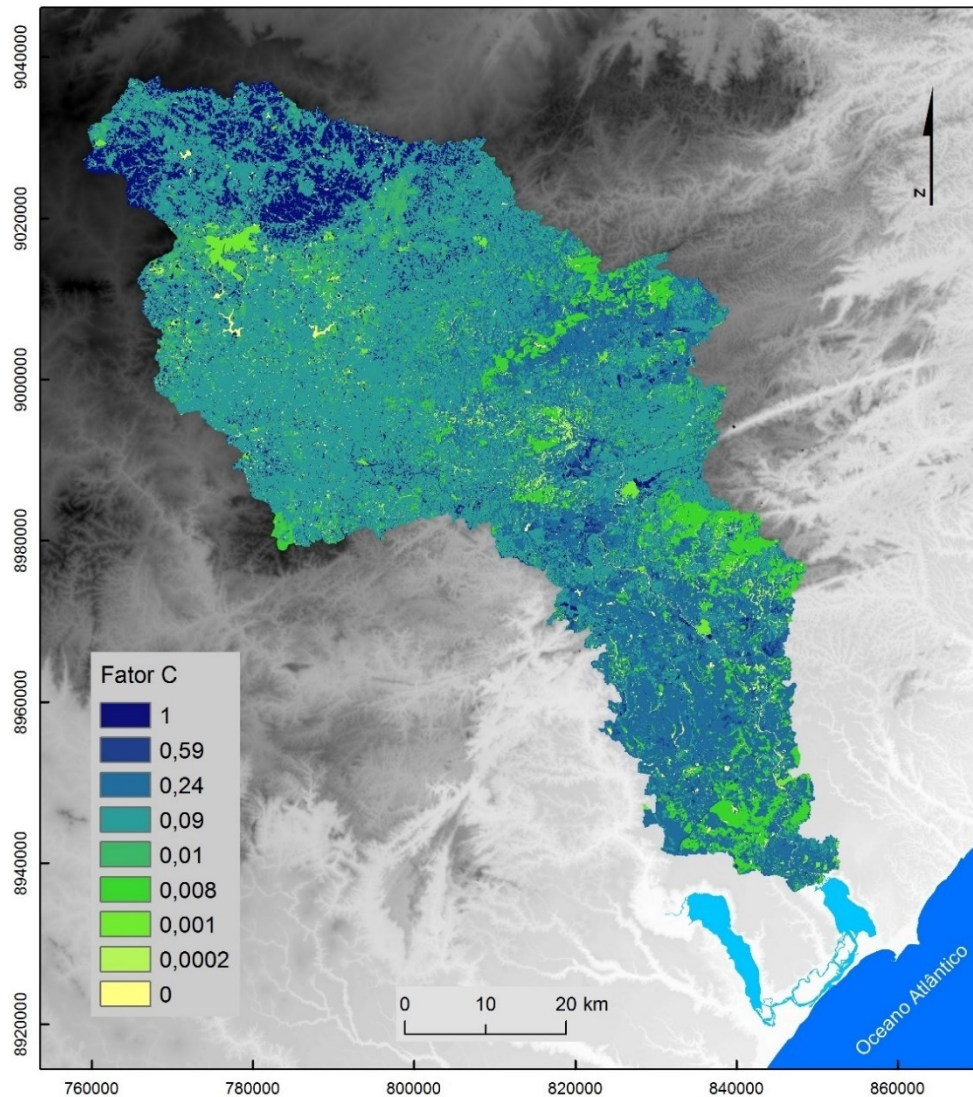


Figura 3.5 – Distribuição espacial do fator C associado aos tipos de ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

De acordo com o mapa do fator C (Figura 3.5), foi constatado que o valor máximo, correspondente à classe solo exposto, está presente essencialmente no setor montante da bacia hidrográfica, onde é predominante. Além de áreas desmatadas e queimadas recentemente, inclui solo exposto por arado/gradeação, solo exposto

ao longo de caminhos e estradas, terraplenagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas.

A classe áreas agrícolas/pasto é predominante em maior parte da bacia hidrográfica deste o setor montante, intermédio, e em menores proporções no setor jusante, próximo à foz da bacia hidrográfica do rio Mundaú (fator C 0,09). A classe da cana-de-açúcar (fator C 0,24) tem sua distribuição espacial desde o setor intermédio ao inferior da bacia hidrográfica.

De forma geral, os valores do fator “C” estão distantes da unidade, o que denota uma forte influência na atenuação a erosão hídrica dos solos. É possível constatar a forte influência das áreas de florestas no controle de erosão dos solos, pois resultaram em baixo valores de erosão laminar nos setores de fragmentos de florestas nas vertentes, nos terrenos húmidos predominantes na planície fluvial e nos fundos de vales.

Com a definição e caracterização espacial e análise dos fatores da EUPS, foi calculada a erosão hídrica potencial dos solos com base nos fatores que representam as condições naturais da bacia hidrográfica (fatores *R*, *K* e *LS*), a fim de conhecer sua predisposição à ocorrência dos processos de erosão hídrica laminar. Em seguida, foi calculada a erosão hídrica real, para estimar a produção média de sedimentos, de acordo com as características naturais da bacia hidrográfica, associadas às ações antrópicas representadas pelos fatores C e P da EUPS.

Para a representação final dos intervalos de classes de suscetibilidade foi utilizada a classificação em quantis (Quadro 3.7).

Quadro 3.7 – Classes utilizadas nos mapas de erosão potencial e erosão real.

Suscetibilidade	t/ha/ano
Muito Elevada	> 28,13
Elevada	12,78 - 28,13
Moderada	5,11- 12,78
Baixa	0 - 5,11
Muito Baixa	0

3.1.4 Erosão real e erosão potencial na bacia hidrográfica

Os resultados da erosão potencial podem ser observados na figura 3.6 e quadro 3.8. De maneira geral, a bacia hidrográfica apresenta forte predisposição à erosão hídrica potencial dos solos, constatado pelo predomínio das classes muito elevada e elevada que, em conjunto, correspondem a 54 % (2215,6 km²) da sua área; a classe moderada corresponde a 213,5 km² (5,2 %); as áreas de baixa e muito baixa erosão potencial correspondem a 1673,9 km², o equivalente a 40,8 % da área da bacia hidrográfica (Figura 3.6 e Quadro 3.8).

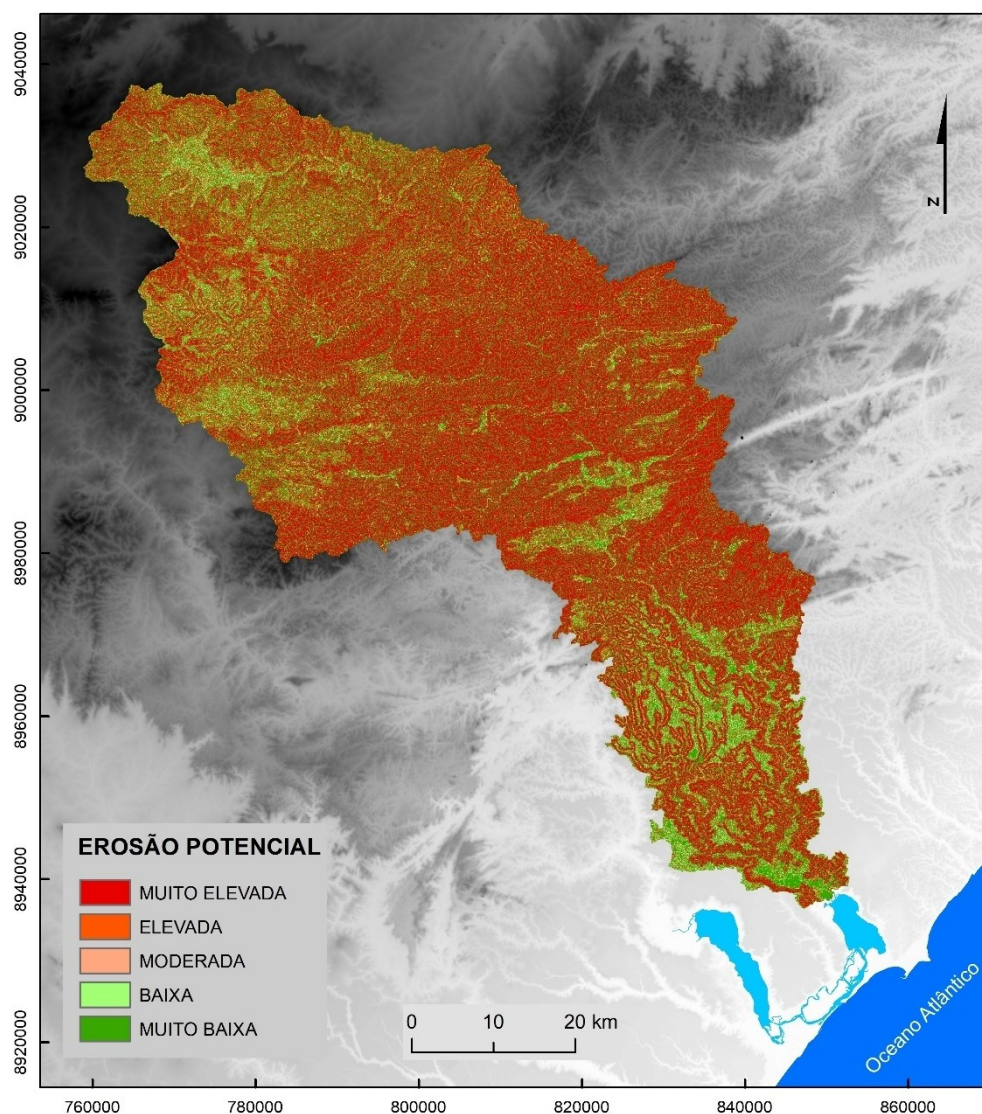


Figura 3.6 – Erosão potencial na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

A erosão potencial muito baixa e baixa são predominantes nos setores mais planos, nas planícies fluviais e nos fundos dos vales (Figura 3.6 e Quadro 3.8).

E no que se refere à erosão real, que considera a influência do uso do solo, se constata que as classes muito elevada e elevada correspondem a 14,1 % da área da bacia hidrográfica (579,1 km²) e este percentual é equivalente a classe moderada; as classes de erosão baixa e muito baixa são predominantes na área de estudo (Figura 3.7 e Quadro 3.8).

O coberto vegetal tem influência decisiva, principalmente na classe “Muito Elevada”, visto que passa de 44,4 para 6,5 %. No entanto, a classe elevada permanece praticamente a mesma para a erosão potencial e real. Todas as restantes classes sofrem um aumento de frequência quando se introduz a ocupação do solo no modelo, mas com variações mais significativas em cada uma destas classes.

Quadro 3.8 – Frequência das classes de erosão potencial e real dos solos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Classes de erosão hídrica do solo		Erosão potencial		Erosão real	
	(t/ha/ano)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito Elevada	> 28,13	1820,1	44,4	267,1	6,5
Elevada	12,78 - 28,13	395,5	9,6	312,7	7,6
Moderada	5,11- 12,78	213,5	5,2	606,0	14,8
Baixa	0 - 5,11	117,7	2,9	1262,6	30,8
Muito Baixa	0	1556,2	37,9	1650,4	40,3

A classe mais baixa (“Muito Baixa”), como seria de esperar, é que sofre menos alteração, visto que o coberto vegetal tem menos importância na proteção dos solos nas áreas onde os outros fatores já inibem os processos de erosão.

Constata-se que, apesar de haver uma diminuição significativa dos valores de erosão, como consequência do coberto vegetal, existe uma forte erosão hídrica laminar na bacia hidrográfica. A erosão hídrica laminar é muito elevada principalmente, no setor superior onde há o predomínio de solo exposto, a montante, nas vertentes com fortes declives, no setor central, e nas vertentes a jusante que correspondem as áreas agrícolas.

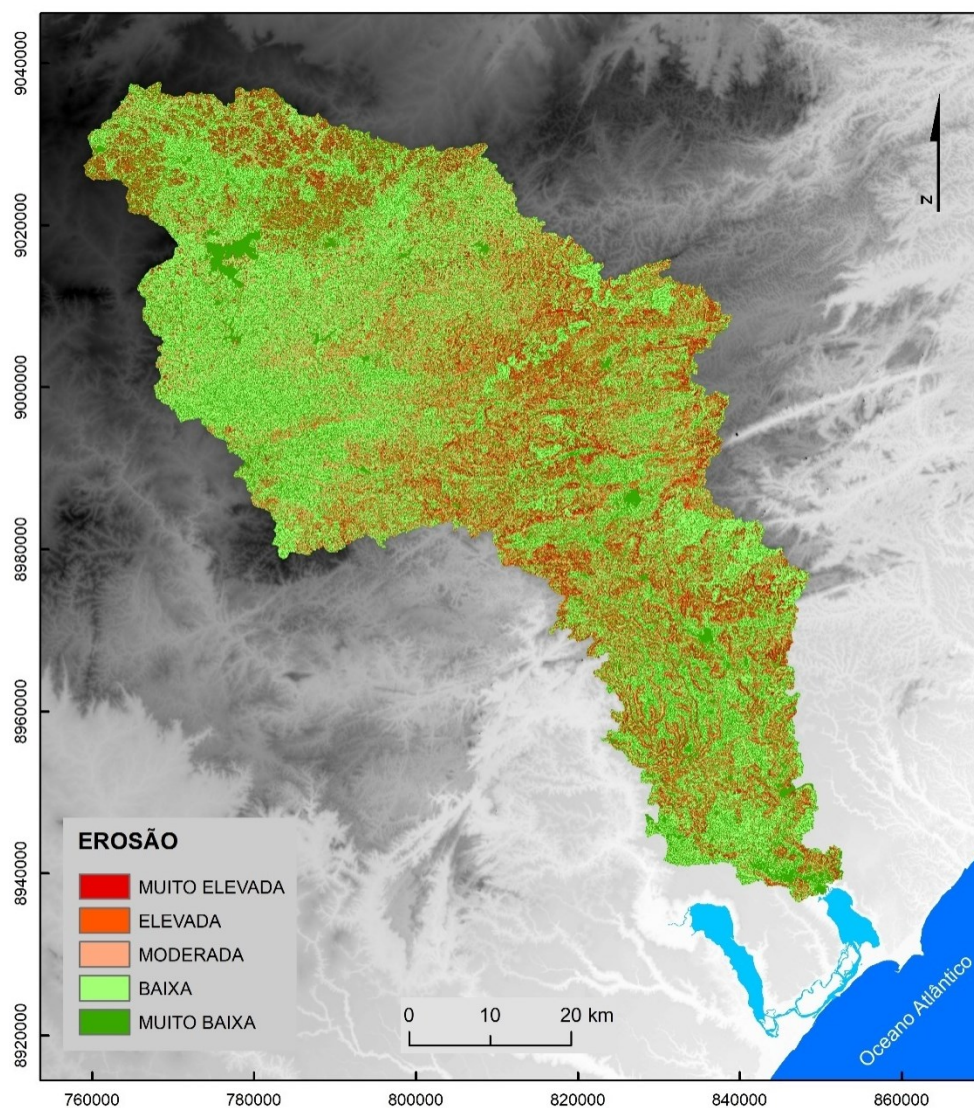


Figura 3.7 – Erosão real na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

3.1.4.1 Comparação da erosão hídrica nos períodos 1990 e 2010/2011

Com o objetivo de observar a evolução da erosão hídrica dos solos, comparou-se a erosão hídrica real nos anos 1990 e 2010 para o setor superior, e nos anos 1990 e 2011, para o setor inferior (jusante) da bacia hidrográfica.

Essa análise comparativa e temporal tem o objetivo de constatar as mudanças potenciais da carga sedimentar transportada pelos cursos de água, decorrente do

processo de erosão hídrica laminar e das alterações do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Se constata que, em 20 anos há o aumento da frequência da erosão hídricas nos dois setores supracitados da bacia hidrográfica e, potencialmente, o aumento da carga sedimentar para os cursos de águas e reservatórios/barragens.

No setor superior, o aumento da classe erosão muito elevada e elevada é 2,6 e 2 %, respectivamente, decorrente, principalmente, do aumento das áreas de solo exposto (Figura 3.8 e Quadro 3.9).

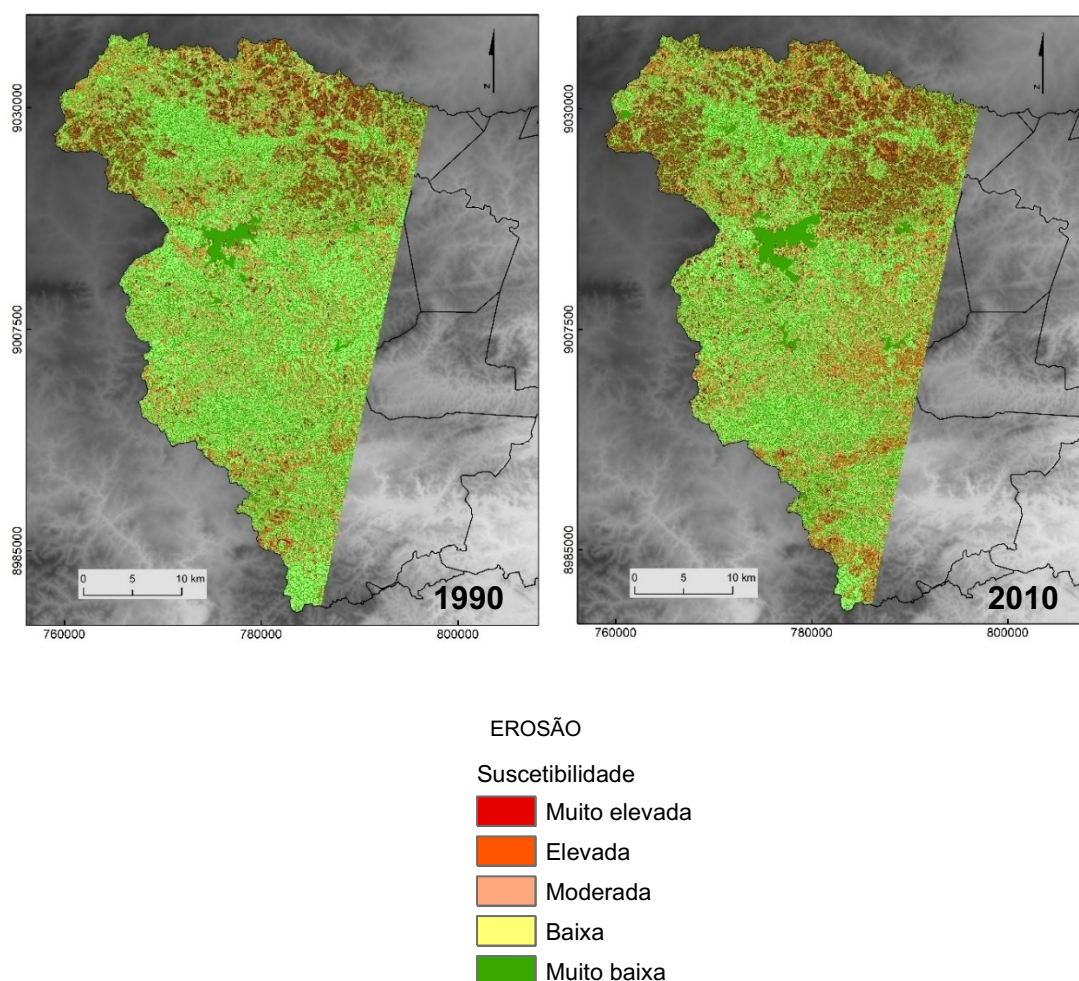


Figura 3.8 – Erosão hídrica do solo no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, nos anos 1990 e 2010.

A classe moderada também cresceu 1,36 % em 2010 devido ao aumento das áreas agrícolas/pasto; as áreas com baixa erosão hídrica diminuíram, e a classe muito baixa aumentou, devido à influência do aumento da área urbana e da classe “água” pela construção de reservatórios/barragens (Figura 3.9 e Quadro 3.9).

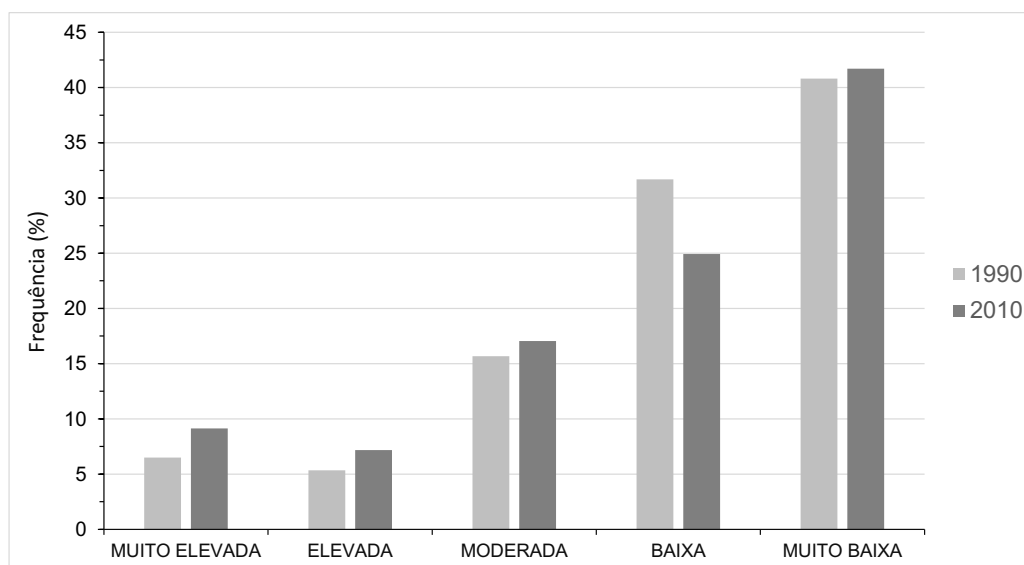


Figura 3.9 – Frequência relativa (%) das classes de erosão hídrica nos anos 1990 e 2010, no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Quadro 3.9 – Erosão hídrica real do solo em 1990 e 2010 no setor superior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Classes	Erosão (t/ha/ano)	1990		2010	
		Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito elevada	> 28,131	79,7	6,5	112,3	9,1
Elevada	12,787 - 28,13	65,6	5,3	88,2	7,2
Moderada	5,115- 12,78	192,7	15,7	209,7	17,06
Baixa	0 - 5,11	389,4	31,7	306,5	25
Muito Baixa	0	501,4	40,8	512,8	41,7

No setor inferior (jusante) da bacia hidrográfica, a erosão hídrica real (1990 a 2011) apresenta aumento da classe de erosão muito elevada (3,4 %) nas áreas de cultivo da cana-açúcar; as áreas de elevada, moderada, baixa e muito baixa erosão hídrica não apresentaram alterações significativas (Figura 3.10, 3.11 e Quadro 3.10). Se observa que a diminuição das áreas de baixa erosão hídrica é devido ao avanço das áreas de erosão hídrica muito elevada no ano de 2011 e o aumento das áreas de muito baixa erosão é devido, principalmente, ao aumento das áreas urbanas.

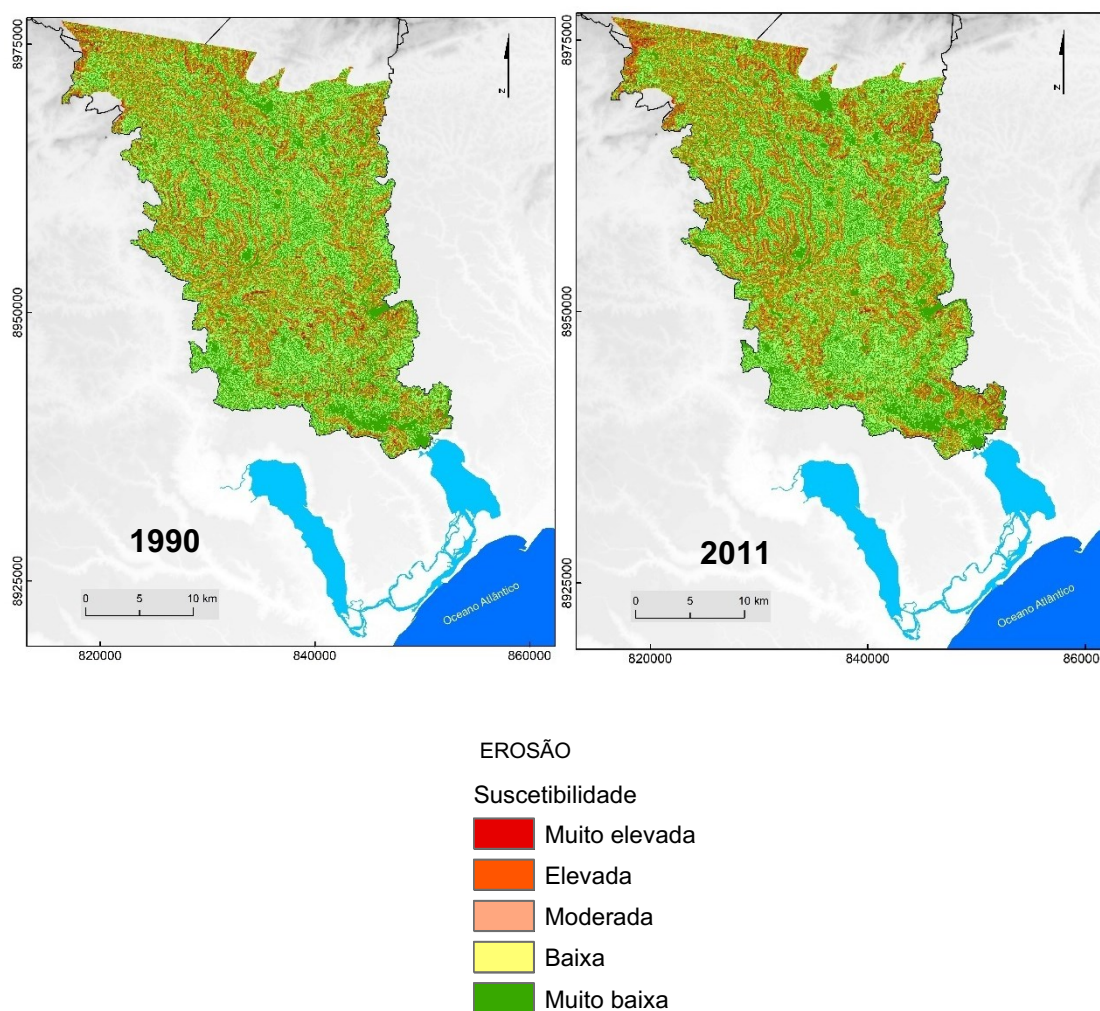


Figura 3.10 – Erosão hídrica no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú, nos anos de 1990 e 2011.

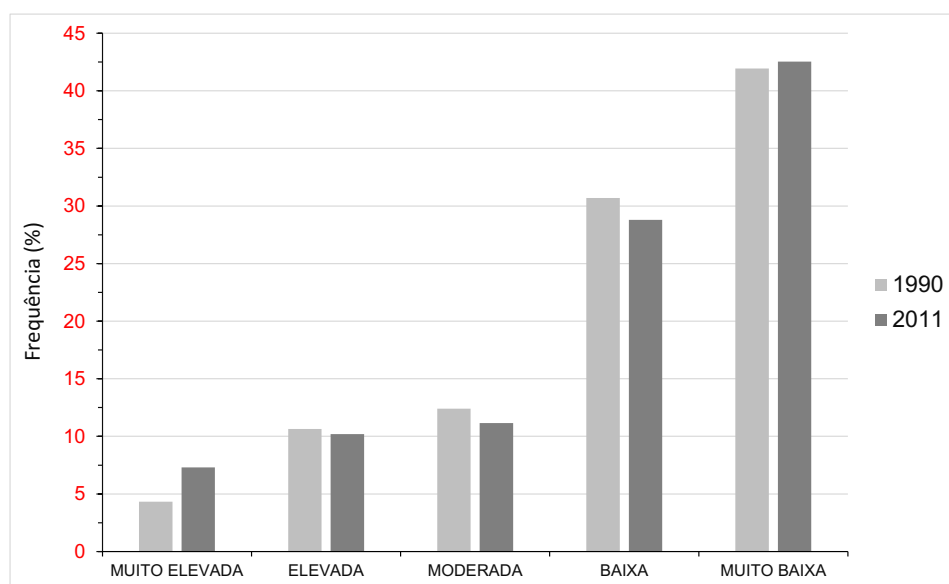


Figura 3.11 – Comparação de frequências das classes de erosão hídrica nos anos 1990 e 2011

Quadro 3.10 – Erosão hídrica real em 1990 e 2011 no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Erosão (classes)	Erosão (t/ha/ano)	1990		2011	
		Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito elevada	> 28,131	33,39	4,3	56,4	7,3
Elevada	12,787 - 28,13	82,24	10,6	78,8	10,2
Moderada	5,115- 12,78	95,85	12,4	86,3	11,2
Baixa	0 - 5,11	237,24	30,7	222,5	28,8
Muito Baixa	0	324,12	41,9	328,7	42,5

3.1.4.1 Discussão dos resultados

A forte predisposição da bacia hidrográfica à erosão hídrica está associada aos elementos que os condicionam, os solos rasos, em áreas de fortes declives,

sobretudo no setor central e, na metade inferior, em solos mais profundos onde a erosividade é mais intensa.

E pela erosão hídrica real, associado ao uso do solo, é possível constatar que as alterações ambientais na bacia hidrográfica intensificaram a perda de solos no período 1990 a 2010/2011, principalmente pela diminuição das áreas de florestas. Com efeito, há intensificação do escoamento superficial e consequentemente o transporte de sedimentos para os fundos de vale e cursos de água.

De acordo com os resultados, percebe-se que a intensificação da erosão hídrica no setor superior da bacia hidrográfica da bacia hidrográfica é o indicativo das alterações ambientais decorrentes do aumento das áreas de solo exposto e nas áreas de pasto decorrente do pisoteio do gado, o avanço das áreas agrícolas em substituição das áreas de florestas são as condições para o aumento da erosão hídrica dos solos.

No setor jusante observou-se especialmente o aumento da erosão hídrica em vertentes dos vales encaixados com maiores declives em áreas de plantio de cana-de-açúcar

As áreas de cana-de-açúcar/solo exposto contribuem para a erosão hídrica dos solos por serem culturas espaçadas que possuem solos expostos entre o cultivo da planta e compõem áreas desprovidas de vegetação que expõem o solo à ação direta da precipitação e, assim, resultam em áreas de muito elevada suscetibilidade à erosão hídrica real.

Se observar nos modelos que as áreas de florestas têm importância fundamental na contenção da erosão hídrica dos solos, a exemplo, as vertentes com presença de floresta ombrófila que apresentaram erosão hídrica muito baixa, pelo que as florestas interceptam a precipitação e minimizam o contato direto da gota de chuva no solo, o que diminui a erosão hídrica dos solos.

As áreas de florestas, urbanas, corpos hídricos (“água”) contribuíram no aumento da classe de muito baixa e na diminuição significativa das áreas de muito elevada no modelo de erosão hídrica real na bacia hidrográfica.

Assim, deve ser dada importância ao uso e ocupação do solo através de programas de gerenciamento ambientais e dos perigos naturais na bacia hidrográfica.

3.2 Caracterização da instabilidade a movimentos de vertente

No contexto dos movimentos de massa, realiza-se a análise de movimentos de vertente, numa abordagem indireta por meio do método estatístico Valor Informativo (VI), tendo como base a menor unidade territorial representada por células de 30 metros (900 m²). O modelo é aplicado com o intuito de avaliar a suscetibilidade a deslizamentos de terras na bacia hidrográfica do rio Mundaú. Destaca-se, na área de estudo, a falta de estudos voltados para a análise de ocorrência de deslizamentos de terras que abordem a suscetibilidade, a perigosidade ou os riscos de movimentos de massa em vertentes.

Nesse sentido, a aplicação do método do valor informativo torna-se adequado à escala da bacia hidrográfica do rio Mundaú visto que seria inviável a aplicação de técnicas de análise da suscetibilidade que necessitassem de dados de entrada medidos *in situ*, por exemplo das propriedades dos solos e/ou das rochas, seja em superfície ou em profundidade.

O modelo de suscetibilidade a movimentos de vertente, assente no valor informativo ou em outros métodos estatísticos, indica que os deslizamentos de terras podem ocorrer nas áreas que tenham as mesmas similaridades das áreas em que já ocorreram deslizamentos de terras e que estes ocorrerão, no futuro, nas mesmas condições que aconteceram no passado (Guzzetti *et al.*, 1999). Nesta perspectiva, os futuros deslizamentos de terras possuem maior probabilidade de

ocorrer sob condições geológicas e geomorfológicas semelhantes às que geraram instabilidade no presente e no passado (Varnes, 1984). Neste contexto, a identificação das áreas onde há maior probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente é fundamental para a adoção de medidas preventivas no território. Além disso, são essas áreas que deverão ter interações mais relevantes com os restantes perigos naturais e tecnológicos à escala da bacia hidrográfica, numa perspetiva de análise multi-perigo.

3.2.1 Elaboração do inventário de movimentos de vertente

Como ponto de partida para o modelo de suscetibilidade a deslizamentos de terras foi necessário a construção de um banco de dados elaborado por meio de inventário de deslizamentos. Segundo Oliveira (2012), os inventários surgem invariavelmente associados a um mapa e a uma base de dados georreferenciados, em que o movimento de vertente é representado graficamente por um único ponto (geralmente o centroide) ou a totalidade da área instabilizada.

O inventário é o registro georreferenciado dos deslizamentos no território que possibilita mensurar a extensão, área e, possivelmente, definir o tipo de deslizamento e o perigo da sua propagação. A elaboração do inventário de deslizamentos depende de técnicas específicas, do objetivo, da extensão da área de estudo, da escala do mapa base e das características dos deslizamentos (Guzzetti *et al.*, 2012). Nesse contexto, os deslizamentos pequenos e superficiais são mapeados por meio do uso de imagens aéreas e orbitais de grande escala, é o caso da presente área de estudo.

Os deslizamentos de terras cartografados, de maneira geral, não apresentaram grandes dimensões e são do tipo translacionais superficiais. Nesse estudo, os movimentos de vertente em taludes das estradas e do tipo desabamento não foram cartografados devido a limitação de representação na escala de análise. Também, foram identificados no setor centro-oeste da área de estudo quedas de

blocos, no entanto não foram inseridos no modelo de suscetibilidade a deslizamentos.

Constatou-se também *in loco*, os movimentos de vertente do tipo *creeping*, movimentações do solo por rastejo; este tipo de movimentação encontra-se nos setores da bacia hidrográfica onde predominam campos e plantio de cana-de-açúcar em vertentes que possuem cortes de estradas que desestabilizam a base da vertente, com declives moderado a alto e, portanto, podem ser classificados por movimentos de vertente que não oferecem perigo em sua propagação. O que se observa, de maneira geral, os deslizamentos são pequenos, superficiais ou incipientes.

No que se refere à criação do inventário e cartografia dos deslizamentos de terras, numa fase inicial recorreu-se a imagens Landsat TM5, mas não foi possível a visualização dos deslizamentos decorrente da resolução espacial de 30 m; sendo assim, buscou-se imagens de satélites de alta resolução espacial que deram auxílio na identificação das cicatrizes dos deslizamentos nas vertentes; dessa maneira, utilizou-se as seguintes base de dados (Quadro 3.11):

i) ortoimagens, limitadas espacialmente à planície fluvial e vertentes de entorno dos canais de drenagens; curvas de níveis geradas a partir do Modelo Numérico de Terreno (MNT LiDAR de alta resolução, ano 2014), ambos os tipos de informação referentes ao território do Estado de Alagoas e cedidos pela secretaria de Estado de Recursos Hídricos e Meio Ambiente de Alagoas (SEMARH);

ii) imagens de satélite por meio do aplicativo *Google Earth pro*;

iii) aplicativo de visualização imagens de satélite em ambiente SIG (*Bing Aerial e Basemap*).

Quadro 3.11 – Base de dados utilizada na elaboração do inventário de movimentos de vertente (deslizamentos).

Plataforma de dados	Fonte de dados	Re (Metros)	Data da imagem
GoogleEarth	Digital Globe	0,5	3/4/2001; 2006; 2009; 29/09/2010 03/05/2010; 2013; 09/02/2014
Bing Aerial	GeoEye	-	3/4/2001; 2014
Basemap	Ikonos	1	31-8-2010
SIG	Ortoimagens	0,5	2014

Re = Resolução espacial.

Fez-se inicialmente a cartografia dos deslizamentos a partir dos dados espaciais supracitados (Quadro 3.11). Posteriormente, realizou-se a etapa de campo e de validação dos deslizamentos e foi ampliada a base de dados.

A pesquisa de campo foi realizada em fevereiro e março de 2015, em que foram identificados deslizamentos no terreno (Figuras 3.12 a 3.17).



Figura 3.12 - Identificação em campo de deslizamentos situados no município de Santana do Mundaú.



Figura 3.13 – Deslizamentos situados na vertente no município de Santana do Mundaú.

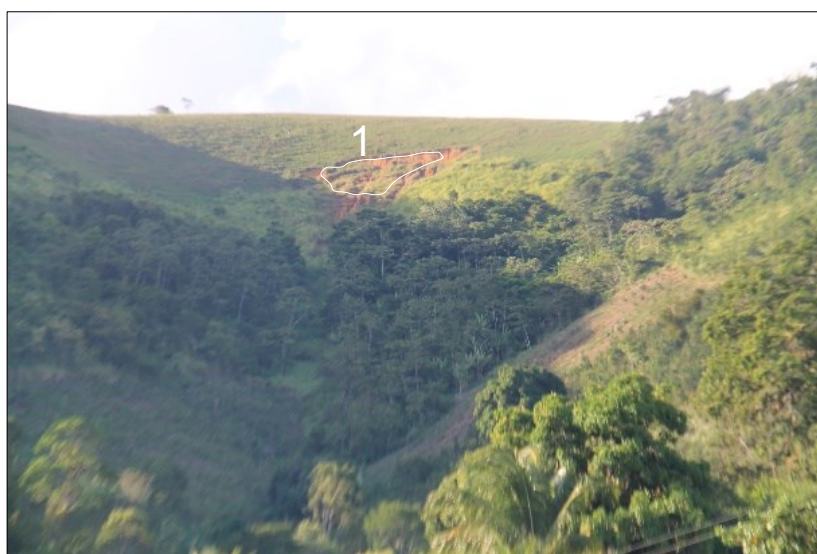


Figura 3.14 – Identificação das roturas de deslizamentos em campo situados no município de Santana do Mundaú.



Figura 3.15 – Marcas de roturas dos deslizamentos identificados em campo na vertente situada no município de Santana do Mundaú com a localização do deslizamento (1) da figura anterior 3.14.



Figura 3.16 – Marcas de roturas dos deslizamentos identificados em campo na vertente situada no município de São José da Lage.



Figura 3.17 – Identificação da rotura de deslizamento da figura 3.16 identificado em campo na vertente situada no município de São José da Lage.

Os deslizamentos foram identificados pela observação de cicatrizes e planos de rotura nas vertentes da bacia hidrográfica e foram cartografados com a geometria de polígonos. Não foram identificadas escoadas em campo, nem nas imagens de satélites e ortoimagens, por isso, impossibilitou elaborar o modelo de suscetibilidade às escoadas.

Inicialmente foram identificados 338 deslizamentos (dos quais são rejeitados 219) e, portanto, estes últimos dados são a base para obter o total final de 119 deslizamentos inventariados.

Com a elaboração e finalização do inventário de deslizamentos, os respetivos polígonos foram convertidos para estrutura matricial com a mesma resolução de 30 metros das variáveis independentes (geomorfologia, litologia, solos, declive e uso do solo), mas resultou em perda de deslizamentos nesse processo de conversão.

Neste processo de conversão dos polígonos de deslizamentos para estrutura matricial em células de 15 e 30 metros, são perdidos 7 e 35 deslizamentos inventariados, respectivamente (Quadro 3.12). Ao diminuir a resolução, os

deslizamentos menores são eliminados, e isso se reflete nos valores da linha “Mínima”, mas também na “Média”, pois esta é feita com menos deslizamentos e sem os menores deslizamentos (Quadro 3.12).

Quadro 3.12 – Parâmetros da área (m²) dos deslizamentos em polígonos e em estrutura matricial com resoluções de 15 e 30 m.

	Parâmetros	Vetor	Matricial (15 m)	Matricial (30 m)
Área (m ²)	Mínima	23,7	225	900
	Média	2900	3 320	4 478
	Máxima	58 108	59 175	61 200
	Número	119	112	84

Num outro exemplo, em particular, noutra área da bacia hidrográfica, a transformação dos polígonos em células de 15 metros não apresentou perda de deslizamentos, mas, na conversão dos polígonos em células de 30 metros, permaneceu apenas um deslizamento, obviamente, com área mínima de 900 m² (Figura 3.18 e Quadro 3.13).

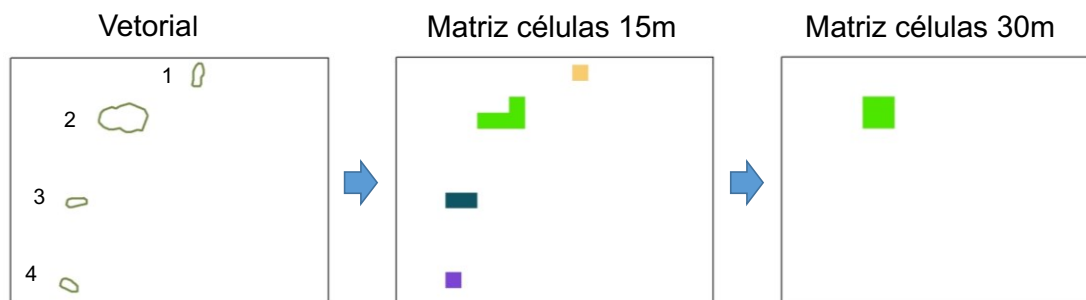


Figura 3.18 – Ilustração dos resultados do processo de transformação das amostras de deslizamentos em polígonos (vetorial) para *raster* (matricial).

Quadro 3.13 – Representação das áreas deslizadas em estrutura vetorial e matricial de 4 deslizamentos.

Deslizamentos	Polígonos (m ²)	Células 15m (m ²)	Células 30m (m ²)
1	165	225	-
2	903	900	900
3	121,6	450	-
4	136,6	225	-
Total	1 326,2	1 800	900

Diante da comparação e análise dos resultados das conversões da estrutura vetorial para matricial pode-se concluir que, para a área de estudo, os deslizamentos são melhores representados em estrutura vetorial no modelo estatístico e preservam áreas deslizadas.

Portanto, os deslizamentos cartografados com dimensões inferiores a 20x20 m (400 m²) são pouco significativos nesta escala regional e são menores do que as células de 30 metros do modelo de suscetibilidade. Dessa forma, utilizou-se o inventário de deslizamentos com área superior a 400 m² no processo de avaliação da suscetibilidade a movimentos em vertentes na bacia hidrográfica do rio Mundaú (Quadro 3.14).

Com a finalização do inventário de deslizamentos foram contabilizados 119 casos, com área total de 328 664,1 m² (Quadro 3.14 e Figura 3.19). Deste total de deslizamentos 29 foram identificados e validados em campo (Quadro 3.14).

Quadro 3.14 – Contabilização e caracterização estatística dos deslizamentos.

Parâmetros	Deslizamentos c/ área > 400 m ²
Média	3791,6
Mínima	426,8
Máxima	58 108,2
Desvio padrão	8073,3
Probabilidade <i>a priori</i>	0,00009

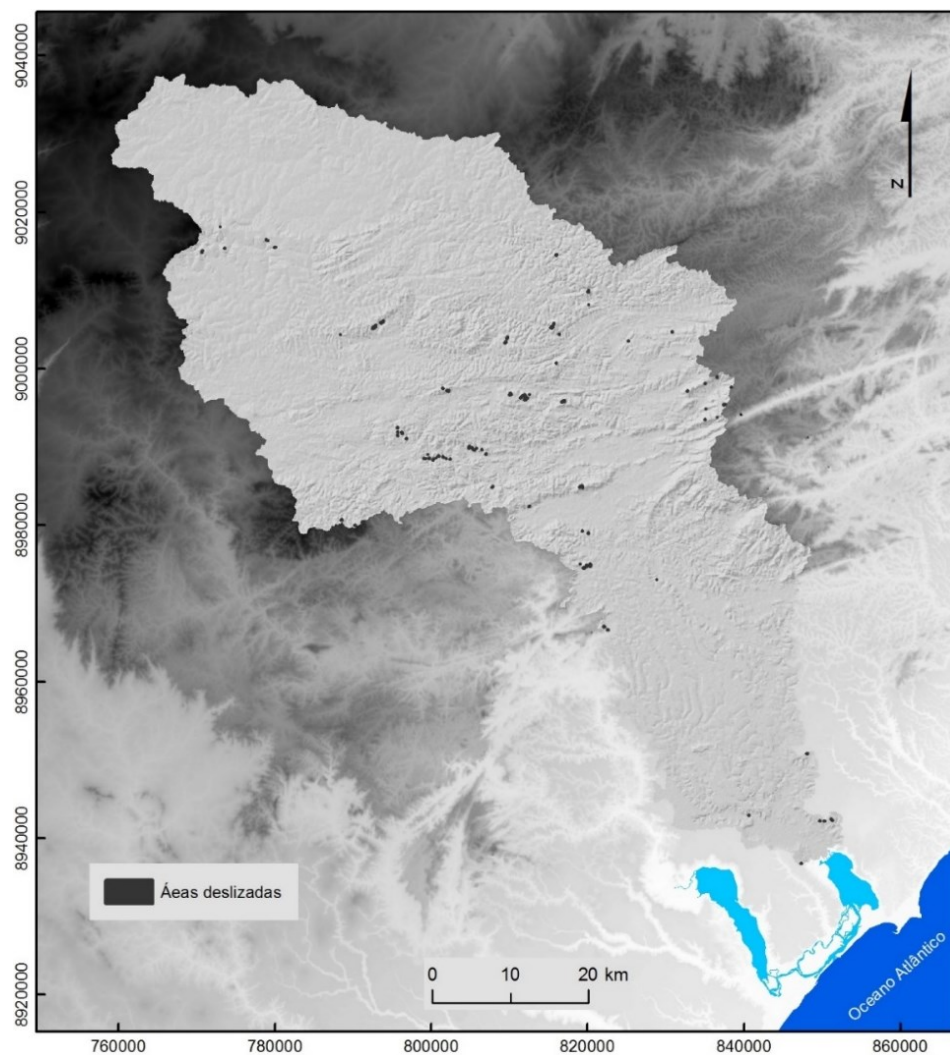


Figura 3.19 – Localização dos deslizamentos de terras que compõem o inventário na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

3.2.2 Fatores utilizados na construção do modelo estatístico de instabilidade de vertentes

As variáveis espaciais que representam os fatores de predisposição utilizados na aplicação do modelo estatístico de suscetibilidade a movimentos de vertente foram provenientes dos bancos de dados seguintes (Quadros 3.15 a 3.19):

- *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da USGS - *United State Geological Survey* (Farr *et al.*, 2007), modelo a partir do qual se derivou o declive;
- imagens de Satélite LandSat TM5, de onde se obteve a cartografia digital de ocupação do solo;
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (Solos);
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Geomorfologia e Litologia);

Quadro 3.15 – Fator Declive (°), utilizado na modelagem da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Classes (°)	Área (%)
D1	45 – 71,8	7,4
D2	35 – 45	12,1
D3	25 – 35	16,6
D4	15 – 25	21,8
D5	10 – 15	14,1
D6	5 – 10	15
D7	0 – 5	13

Fonte: SRTM, resolução 30 metros

Quadro 3.16 – Fator Ocupação do Solo, utilizado na modelagem da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Classes	Área (%)
U1	Solo exposto	8,1
U2	Urbano	0,9
U3	Floresta mista	6,5
U4	Agrícola e Pasto	47,6
U5	Floresta Ombrófila	6,9
U6	Cana-de-açúcar/pasto	24,3
U7	Cana de açúcar /solo exposto	2,1
U8	Terrenos húmidos	2,7
U9	Corpos d'água	0,8

Fonte: LandSat TM 5, resolução 30 metros.

Quadro 3.17 – Fator Solos, utilizado na modelagem da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Solos	Área (%)
S1	Neossolos regolíticos eutróficos	13,0
S2	Planossolos Nátricos	5,56
S3	Latossolos - Amarelos	22,5
S4	Argissolos - Amarelos	22,3
S5	Argissolos - Vermelhos	13,8
S6	Neossolos Litólicos	0,36
S7	Neossolos Litólico Eutróficos	0,42
S8	Planossolos Háplicos	0,29
S9	Latossolos Vermelho - Amarelos	0,69
S10	Argissolo Vermelho - Amarelos	16,9
S11	Gleissolos Háplicos	2,70
S12	Neossolos Flúvicos	1,12
S13	Área de acumulação	0,001
S14	Neossolos Quartzarênicos	0,10
S15	Solos de Mangue	0,03

Fonte: Embrapa, 1:100 000

Quadro 3.18 – Fator Geomorfologia, utilizado na modelagem de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Classes	Área (%)
G1	Chapadas e Platôs	6,9
G2	Planalto	16,1
G3	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	47,2
G4	Domínio de Morros e de Serras Baixas	13,6
G5	Escarpas Serranas	4,5
G6	Superfície Aplainadas conservadas	3,2
G7	Vales Encaixados	0,005
G8	Leito fluvial rochoso	0,1
G9	Superfícies aplainadas retocadas ou degradadas	0,5
G10	Tabuleiros Dissecados	6,5
G11	Rebordo Erosivo	0,7
G12	Depósitos Flúvio - lagunares	0,02
G13	Planícies Flúvio-Marinhas e Flúvio-Lagunares	0,8

Fonte: CPRM, 1/250 000.

Quadro 3.19 – Fator Litologia, utilizada na modelagem de avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Sigla	Classes	Área (%)
L1	Anfibolito, Migmatito, Metadiorito, Ortognaisse Granodiorítico, Ortognaisse Tonalítico	44,5
L2	granodioríticos a graníticos	5,7
L3	quartzitos micáceos, quartzitos-feldspáticos e rochas calcissilicáticas	4,4
L4	biotita e/ou muscovita xisto gnaisse, migmatito, níveis de quartzito e mármore	15,0
L5	cianita-granada	0,3
L6	metagranitóides, ortognaisses e migmatíticos	4,6
L7	Granito e granodiorito, grossos a porfíricos, com ou sem epidoto magmático	4,0
L8	granito e granodiorito, grossos a porfíricos, com ou sem epidoto magmático, associados a diorito e fases intermédias de mistura, calcialcalinos que correspondem as rochas maciças	1,4
L9	argilito arenoso, arenito conglomerático, são sedimentos incosolidados	5,6
L10	Rocha granulítica, Kinzigito, Paragnaisse	12,4
L11	conglomerados cinzentos e castanhos, com seixos e matações de rochas graníticas	1,3
L12	Depósitos de areia e rocha pelítica	0,8

Fonte: CPRM, 1/250 000.

3.2.3 O método estatístico Valor Informativo (VI)

Na avaliação da suscetibilidade utilizou-se, nesse estudo, o método estatístico bivariado Valor Informativo (VI), aplicado à modelagem de deslizamentos (Yin e Yan, 1988; Yan, 1988; Wu, 2000; Zêzere, 2002); este método tem sido aplicado com êxito em Portugal por vários autores (por exemplo: Zêzere *et.al.*, 2004; Oliveira *et.al.*, 2009; Pereira *et.al.*, 2012; Garcia, 2012; Oliveira *et al.*, 2015) (Figura

3.20). Nesse modelo estatístico, é levada em consideração a probabilidade *a priori* para toda a área em estudo e a probabilidade condicionada é calculada para cada classe de fator de predisposição (Equação 3.5).

$$I_i = \log n \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (3.5)$$

I_i – valor informativo da variável i (classe x do fator de predisposição y);

S_i – número de unidades de terreno com deslizamentos e presença da variável i ;

N_i – número de unidades de terreno com a presença da variável i ;

S – total de unidades de terreno com deslizamentos;

N – total de unidades de terreno da área em estudo.

O valor final é produto da soma do valor informativo calculado para cada variável do fator de predisposição pela a equação 3.6.

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} \times I_i \quad (3.6)$$

Sendo:

I_j - valor informativo da unidade de terreno;

n – número de variáveis;

X_{ji} – presença (1) ou a ausência (0) da variável na unidade de terreno;

I_i – valor informativo da variável.

3.2.3.1 Validação do modelo de suscetibilidade a movimentos de vertentes

Após a aplicação do método estatístico foi feita a validação dos resultados para avaliar a qualidade do modelo; para isso foi feito o cálculo da curva de sucesso,

realizado de acordo com as áreas deslizadas e as áreas do modelo de suscetibilidade utilizadas para o cálculo do Vi:

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(L_{si} - L_i) \times \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (3.8)$$

Sendo:

AAC – área abaixo da curva;

L_{si} – o valor superior do intervalo (abscissas);

L_i - o valor inferior do intervalo (abscissas);

a_i – valor da ordenada correspondente;

b_i – valor da ordenada dependente;

i – número de intervalo de valor ou número da classe.

De acordo com Guzzetti *et al.* (2006), a validação de um modelo através dos dados que o alimentaram e deram origem permite: (i) avaliar o grau de concordância entre os níveis de suscetibilidade e a distribuição de movimentos nessa área; (ii) avaliar o papel de cada fator de predisposição utilizado na construção do modelo; (iii) avaliar a capacidade do modelo para lidar com alterações nos dados de entrada; (iv) determinar o erro associado à estimativa da suscetibilidade obtida. Assim, a avaliação qualitativa do modelo estatístico foi realizada de acordo com o quadro 3.20.

Quadro 3.20 – Qualidade dos modelos de suscetibilidade, de acordo com Guzzetti *et al.* (2006).

Área Abaixo da Curva (AAC)	Qualidade do Modelo
0,75	Aceitável
>0,80	Muito satisfatório
>0,90	Modelo que acerta com grande qualidade o Inventário de movimento de vertentes

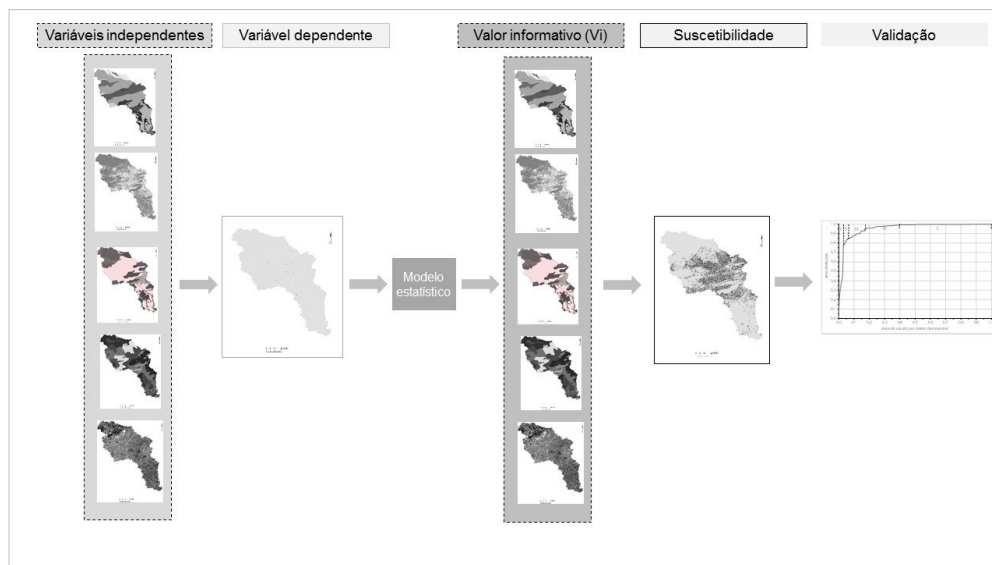


Figura 3.20 – Fluxograma da aplicação do modelo de suscetibilidade valor informativo na área de estudo.

3.2.4 Cálculo da suscetibilidade e validação dos resultados

3.2.4.1 Valor informativo para cada fator

Para a realização do cálculo do valor informativo foram utilizadas 5 variáveis independentes: Declive, Ocupação do solo, Geomorfologia, Litologia e Solos. Os resultados são apresentados nos quadros 3.21 a 3.25.

O processo de tabulação das variáveis independentes com os deslizamentos foi feito em estrutura vetorial e, posteriormente, convertidos os valores da probabilidade condicionada para a estrutura matricial e calculado o valor informativo. Tal como as 4 variáveis independentes, o declive, derivado do MDE (SRTM), foi transformado em vetor e cruzados com os deslizamentos em estrutura vetorial.

No que se refere ao valor do VI, quanto mais elevado maior é a propensão para a ocorrência de deslizamentos; os valores negativos caracterizam as áreas menos suscetíveis à instabilidade das vertentes (Garcia, 2012). Quando o valor do VI é

negativo, significa que a variável independente não é determinante na ocorrência dos movimentos de vertente (Melo & Zêzere, 2017).

Na ausência de deslizamentos, a probabilidade condicionada é igual a zero e a transformação logarítmica não é obtida. Nesta situação, de acordo com Guillard & Zêzere (2012), é necessário fornecer um valor decimal abaixo do menor valor informativo obtido com as áreas deslizadas.

Tal como se observa nos resultados apresentados nos quadros 3.21 a 3.25 (resultados de VI das variáveis independente), os valores negativos mais baixos do VI correspondem à ausência de deslizamentos.

Assim, os resultados obtidos do VI para o fator declive apresentam propensão à ocorrência de deslizamentos em áreas de declives maiores ou iguais a 45 graus (classe D1), com valor de VI acima de 2 (Quadro 3.21).

Quadro 3.21 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Declividade.

Sigla	Área (m ²)	Área deslizada (m ²)	ProbC	VI
D1	302577300	310500	0,001026	2,456
D2	498554100	30600	0,000061	-0,360
D3	683460900	17100	0,000025	-1,258
D4	892480500	0	0,00000	-4,037
D5	578635200	900	0,000002	-4,036
D6	611625600	1800	0,000003	-3,398
D7	532750500	0	0	-4,037

Para o significado das siglas, ver Quadro 3.15. ProbC = Probabilidade condicionada.

Quanto ao fator uso do solo, o VI é superior a 1 apenas em áreas de fragmentos de florestais (classe U3), embora também apresente valores positivos em áreas de floresta ombrófila (classe U5) e de cana de açúcar/solo exposto (classe U7); as demais classes apresentam valores negativos (Quadro 3.22).

Quadro 3.22 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Uso do Solo.

Sigla	Área (m ²)	Área deslizada (m ²)	ProbC	VI
U1	332405456	9900	0,00003	-1,132
U2	37464656	0	0	-1,325
U3	267487556	87300	0,000326	1,262
U4	1954068656	179100	0,000092	-0,008
U5	284360756	28800	0,000101	0,092
U6	998130056	56700	0,000057	-0,486
U7	87327356	14400	0,000165	0,579
U8	109857056	2700	0,000025	-1,324
U9	31965656	0	0	-1,325

Para o significado das siglas, ver Quadro 3.16. ProbC = Probabilidade condicionada.

No fator solos, apenas os Neossolos Litólicos (classe S6) nos setores intermédio e inferior da bacia hidrográfica apresentam pontuação elevada de VI; os demais valores de VI são baixos a negativos (Quadro 3.23).

Quadro 3.23 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Solos.

Sigla	Área (m ²)	Área deslizada (m ²)	ProbC	VI
S1	535144200	0	0	-0,674
S2	228294100	0	0	-0,674
S3	923236200	117600	0,00013	0,321
S4	917499400	129800	0,00014	0,426
S5	568550200	26800	0,00005	-0,673
S6	15009200	27500	0,00183	2,987
S7	17239400	0	0	-0,674
S8	12119200	0	0	-0,674
S9	28383200	0	0	-0,674
S10	695332000	77200	0,00011	0,184
S11	110920500	0	0	-0,674
S12	45828100	0	0	-0,674
S13	164700	0	0	-0,674
S14	4028400	0	0	-0,674
S15	1318400	0	0	-0,674

Para o significado das siglas, ver Quadro 3.17. ProbC = Probabilidade condicionada.

No que se refere ao fator geomorfologia, alcançou maior pontuação de VI nas classes de Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos (G3) e nos domínios

de Morros e de Serras Baixas (G4), essas duas classes juntas correspondem a 60,8 % da área de estudo; as demais classes atingiram valores de VI negativos (Quadro 3.24).

Quadro 3.24 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Geomorfologia.

Sigla	Área (m ²)	Área deslizada (m ²)	ProbC	VI
G1	280787400	1800	0,00001	-2,620
G2	659481300	21600	0,00003	-0,988
G3	1934806500	194400	0,00010	0,132
G4	557464500	126900	0,00023	0,950
G5	184529700	9900	0,00005	-0,495
G6	132384600	0	0	-2,621
G7	250200	0	0	-2,621
G8	2618100	0	0	-2,621
G9	18868500	0	0	-2,621
G10	265448700	6300	0,00002	-1,311
G11	30972600	0	0	-2,621
G12	1115100	0	0	-2,621
G13	31599900	0	0	-2,621

Para o significado das siglas, ver Quadro 3.18. ProbC = Probabilidade condicionada.

De entre as 5 variáveis independentes, a litologia (Figura 2.3) foi a que alcançou mais classes com valores positivos de VI. O valor mais elevado foi obtido na classe L8 (1,39), único valor acima de 1, em granitos e granodioritos; em outras 4 classes (L1, L4 e L6), os valores são positivos mas inferiores a 1; quanto às classes restantes, os valores de VI são negativos (Quadro 3.25).

Quadro 3.25 – Cálculo do valor informativo (VI) para cada classe do fator Litologia.

Sigla	Área (m ²)	Área deslizada (m ²)	ProbC	VI
L1	1826432200	217800	0,000119	0,255
L2	228205900	7200	0,000032	-1,075
L3	180626200	1800	0,00001	-2,227
L4	614243600	86400	0,000141	0,42
L5	11769300	0	0	-2,228
L6	190296100	33300	0,000175	0,639
L7	164672900	9000	0,000055	-0,525
L8	58052000	21600	0,000372	1,393
L9	233487000	0	0	-2,228
L10	508059300	0	0	-2,228
L11	52640200	1800	0,000034	-0,994
L12	34582500	0	0	-2,228

Para o significado das siglas, ver Quadro 3.19. ProbC = Probabilidade condicionada.

3.2.4.2 Suscetibilidade a instabilidade de vertentes

A partir dos resultados do valor informativo calculado para os fatores de predisposição, realizou-se a integração destas variáveis espaciais; o resultado do modelo estatístico é apresentado na figura 3.21 a partir da classificação da suscetibilidade com base na curva de sucesso utilizada na fase de validação do modelo.

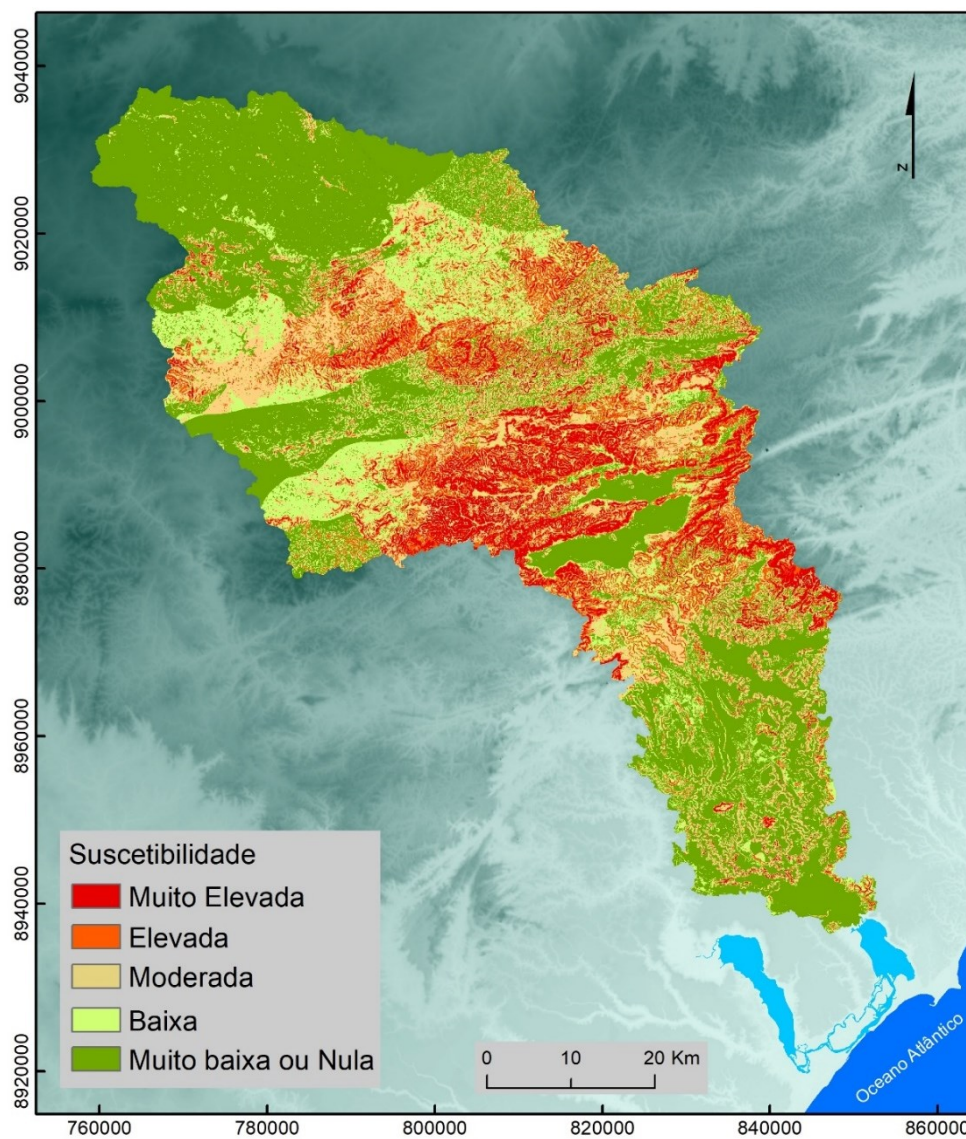


Figura 3.21 – Suscetibilidade a deslizamentos de terras na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Assim, se pode constatar que a bacia hidrográfica do rio Mundaú apresenta suscetibilidade a deslizamentos reduzida ou nula em maior parte da área de estudo (43,3 %) que corresponde a 1774,8 km²; a suscetibilidade baixa é predominante (14,8 %) na metade superior da área de estudo e corresponde a 608,2 km²; a suscetibilidade moderada abrange 20,1 % (823 km²) desde a metade superior, setor central e inferior da bacia hidrográfica; as áreas de suscetibilidade elevada (11,9 %) e muito elevada (10 %) corresponderam a 487,2 e 405,1 km²,

respectivamente. O predomínio da suscetibilidade elevada e muito elevada correspondem a grande parte do setor intermédio e metade inferior, que apresentam, assim, maior propensão a movimentos de vertente na bacia hidrográfica.

3.2.4.3 Validação do modelo de suscetibilidade

Na sequência dos resultados obtidos no modelo do VI, realizou-se a respetiva validação através do cruzamento do inventário de deslizamentos com os valores contínuos de suscetibilidade (Figura 3.22). Para avaliação do desempenho do modelo foi construída a curva de sucesso e calculada a área abaixo da curva (AAC); esta última apresentou o resultado de 0,92. Em termos práticos, a suscetibilidade muito elevada engloba 64 % dos deslizamentos e abrange 5 % da área de estudo; por seu lado, a suscetibilidade elevada incorpora 16 % dos deslizamentos corresponde a 10 % da área de estudo.

A classificação do mapa de suscetibilidade foi efetuada de acordo com o resultado da curva de sucesso; as suscetibilidades muito elevada (I) e elevada (II) representaram 21,7 %, que corresponde a 1379,3 km² da área de estudo. E o percentual total das demais classes III, IV e V, que abrangem 78,2%, totaliza 3206 km² da bacia hidrográfica do rio Mundaú (Quadro 3.26).

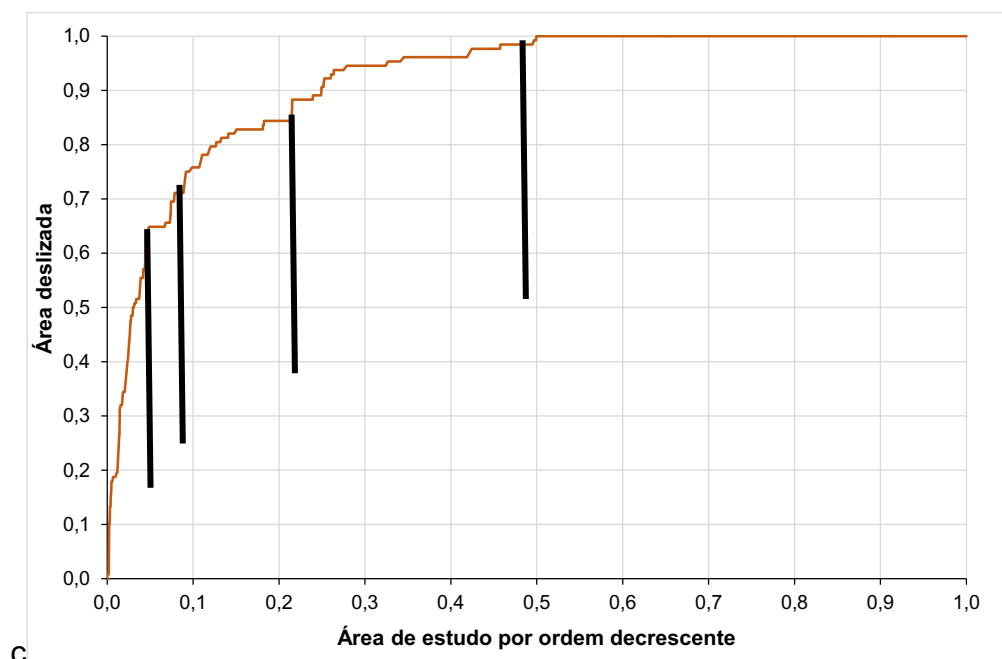


Figura 3.22 – Resultado da validação do modelo de suscetibilidade a deslizamentos.

Quadro 3.26 – Classificação do modelo de suscetibilidade e frequência das classes de suscetibilidade na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Classes	Nº Células	Suscetibilidade	Legenda	%
I	452380	Muito Elevada		9,8
II	542072	Elevada		11,9
III	915593	Moderada		20,1
IV	675960	Baixa		14,8
V	1972952	Muito baixa ou nula		43,3

3.2.5 Discussão dos resultados

A validação do modelo estatístico de suscetibilidade pelo desempenho obtido da Área Abaixo da Curva (AAC) acerta com grande qualidade o inventário de movimentos de vertente. A limitação do modelo é devido a área de estudo ser

bastante grande e a escala de análise não é de muito detalhe; além disso, a informação geográfica utilizada não tem, em alguns casos, o detalhe geométrico e temático adequado (solos, geologia, geomorfologia, etc). E no que se refere aos deslizamentos, o levantamento deverá estar um pouco enviesado, pois foi efetuado a partir de imagens sem grande detalhe e o trabalho de campo não incidiu (nem seria possível) em toda a área de estudo devido a área da bacia hidrográfica ser muito grande.

E de entre as variáveis independentes, a Litologia apresenta maiores valores de VI em classes pelo que são muito gerais e englobam grande parte dos deslizamentos e, portanto, maior influência na determinação espacial das áreas de muito elevada a elevada suscetibilidade a deslizamentos de terras que, associado as pontuações positivas de VI da variável independente Declive (Classe D1 com 45 a 71,8 graus) Solos nas classes Latossolos Amarelo e Argissolos Amarelos, apontou o setor intermédio da bacia hidrográfica o de maior suscetibilidade a movimento de massa em vertentes (Figura 3.21).

A suscetibilidade a deslizamentos de terras elevada a muito elevada compreendem vertentes com declives a partir dos 25 graus em afloramento de rochas e solos rasos no setores da bacia hidrográfica:

- I) metade superior e principalmente no setor central, nas vertentes mais suscetíveis de litologia composta por biotita, muscovita xisto gnaiss, migmatito e níveis de quartzo, anfibólio e mármore e mais a jusante os Metadioritos, Ortognaisse Granodiorítico, Ortognaisse Tonalíticos em domínios de colinas dissecadas e de morros e serras Baixas e com o predomínio dos Latossolos Amarelos. E no interflúvio oeste nas Escarpas Serranas e oeste nos Domínio de Morros e de Serras Baixas de rochas do tipo granito e granodiorito e fases intermédias de mistura onde estão os Neossolos regolíticos eutróficos, Argissolos Amarelos e Vermelhos em terras agrícola /pasto e de fragmentos de florestas ombrófilas e mistas;

- II) Na metade inferior da bacia hidrográfica nos Metagranitóides, ortognaisses, migmatíticos, granodiorítica, quartzo-monzonítica e tonalítica compõem o domínio de morros e de serras baixas. Nas vertentes e interflúvio de leste, nos domínios das escarpas serranas constituída por rochas ortognaisse granodioritos, graníticas ou granodioríticas e nos Domínios de Morros e de Serras Baixas com predomínio dos granitos e granodioritos e rochas granulíticas, kinzigito e paragnaisse. E mais a jusante, próximo a foz da bacia hidrográfica nas vertentes de leste e oeste os deslizamentos estão associados a litologia de Argilito arenoso, Arenito conglomerático nos domínios dos tabuleiros costeiros em Argissolos Vermelho – Amarelos e Latossolos Amarelos com o uso predominante do cultivo da cana-de-acúcar e áreas de solo exposto e com frangmentos de florestas.

3.3 Inundações fluviais

Nesse subponto é efetuada a caracterização das inundações fluviais a partir da componente hidrológica, tendo como ponto de partida os dados de vazão. Assim, realizaram-se ensaios estatísticos e a análise dos totais mensais, a comparação entre as vazões nos períodos de estiagem e húmido, a identificação dos principais eventos de inundações fluviais, a avaliação das vazões associadas aos impulsos da precipitação a montante pelo uso de dados diários e o tempo de resposta de elevação nos níveis dos rios. Também se insere nesse ponto a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica, a avaliação da suscetibilidade às inundações fluviais e uma breve referência aos perigos tecnológicos de rompimento de barragens e industriais.

A designação inundação fluvial é utilizada ao longo deste subcapítulo por ser o termo em comum em ambos os países, Portugal e Brasil.

3.3.1 Caracterização dos caudais na bacia hidrográfica do rio Mundaú

As informações hidrométricas utilizadas na caracterização das vazões na bacia hidrográfica do rio Mundaú teve como base o banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), órgão responsável pelo monitoramento hidrológico e meteorológico das regiões hidrográficas do Brasil. Para a área de estudo encontram-se disponíveis os dados diários de 4 estações de medição de vazão situadas no território alagoano, no setores intermédio e inferior da bacia hidrográfica (Figura 3.23).

3.3.1.1 Dados utilizados na caracterização e análise das vazões

Dentre as estações fluviométricas utilizadas nesse trabalho, a estação Murici–Ponte é a que possui série mais longa, mas, como as demais estações, apresenta grande quantidade de falhas; a estação fluviométrica estação Fazenda Boa Fortuna é a segunda em quantidade e em tamanho da série. As séries de dados de vazão das estações Santana do Mundaú, São José da Lage e União dos Palmares possuem períodos similares, porém com quantidade significativa de falhas nas séries (Quadro 3.27). As estações Murici - Ponte, com 36 anos de dados, e Fazenda Boa Fortuna, com 27, apresentam quantidade de falhas significativas que comprometem a análise de toda a série histórica.

Nesse sentido, utilizou-se os anos em comum entre os dados das 5 estações fluviométricas: Santana do Mundaú, situada no curso d'água que representa o setor intermédio e margem direita (rio Mundaúzinho), que compreende a sub-bacia com área de drenagem de 766,15 km²; ainda no setor intermédio e margem esquerda da bacia hidrográfica, na sub - bacia do rio Canhotinho, está localizada a estação de São José da Lage com área de drenagem de 1 176,03 km² (Quadro 3.28; Figura 3.23).

Quadro 3.27 – Período de dados das estações fluviométricas.

Identificação			Funcionamento			
Nome	Código	Rio	Início	Fim	Série (anos)	Falhas (meses)
São José da Lage	39720000	Canhoto	22/10/1990	31/5/2016	19	37
Santana do Mundaú	39700000	Mundaú	1/9/1992	31/5/2016	17	9
União do Palmares	39740000	Mundaú	25/10/1990	31/5/2016	19	23
Murici - Ponte	39760000	Mundaú	1/12/1965	31/5/2016	36	53
Fazenda Boa Fortuna	39770000	Mundaú	1/1/1974	31/5/2016	27	1

Quadro 3.28 – Caracterização geográfica das estações fluviométricas.

Nome	Código	Município	Altitude (m)	Área (km ²)
São José da Lage	39720000	São José da Laje	230	1 176,03
Santana do Mundaú	39700000	Santana do Mundaú	267	766,14
União do Palmares	39740000	União do Palmares	142	2907,57
Murici - Ponte	39760000	Murici	87	3296,27
Fazenda Boa Fortuna	39770000	Rio Largo	50	3558,23

Características comuns às 5 estações: Unidade de Federação (UF) de Alagoas (AL); responsável/operador ANA/CPRM; em atividade.

No rio Mundaú, a jusante e recebendo a contribuição das vazões nas anteriores, está localizada a estação de União do Palmares, com área de drenagem de 2907,57 km².

A jusante da estação de União dos Palmares, estão localizadas as outras duas estações, também ao longo do rio Mundaú: no setor inferior da bacia hidrográfica, encontra-se a estação fluviométrica Murici - Ponte, com área de drenagem de 3296,27 km²; mais próximo da foz do rio Mundaú, está situada a estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna, com área de drenagem de 3558,23 km² (Figura 3.23).

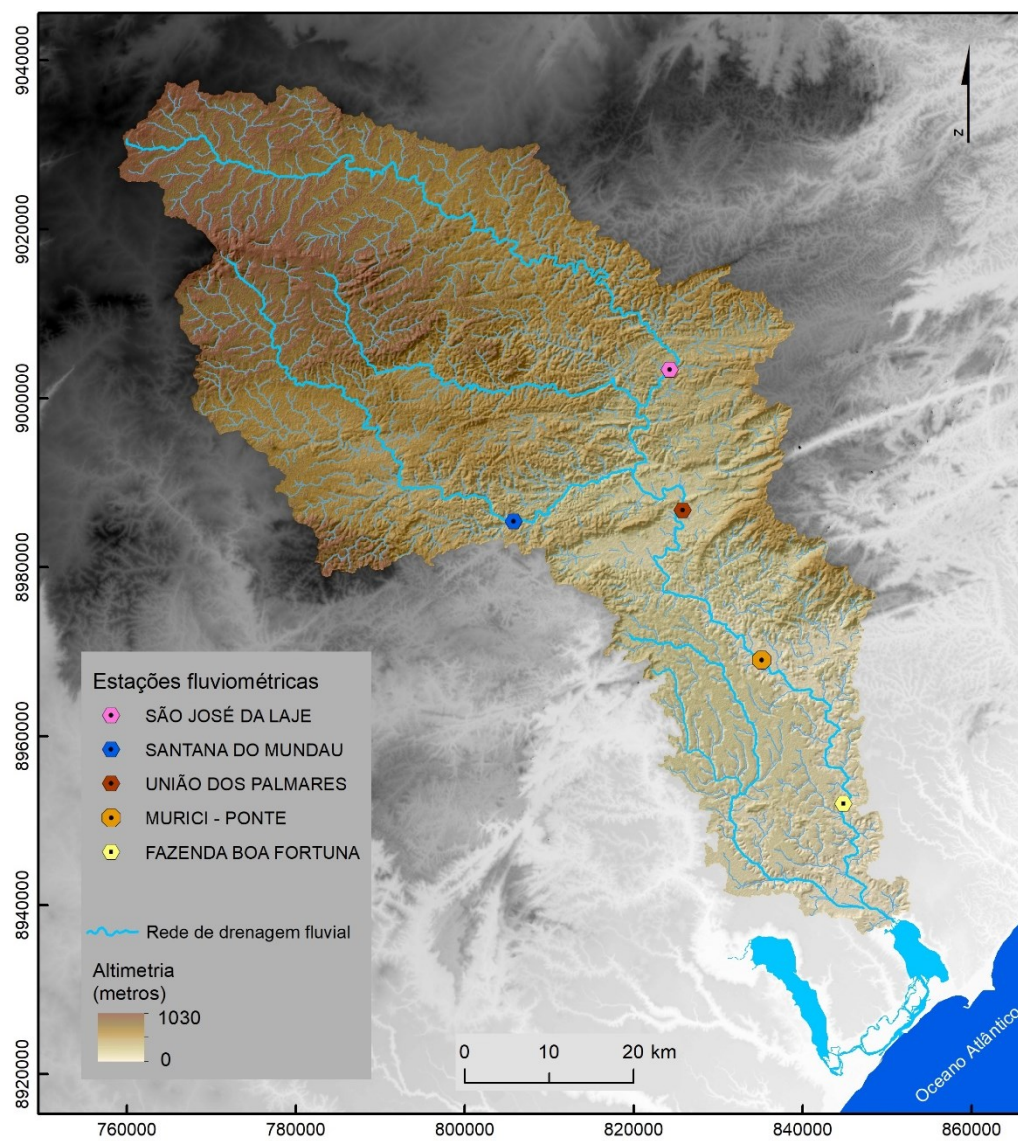


Figura 3.23 – Localização das estações fluviométricas e rede hidrográfica na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Diante dos dados das 5 estações fluviométricas, buscou-se definir o período de dados das séries hidrológicas a partir dos anos em comum e com os mesmos números de dados mensais e de falhas. Para tanto, selecionou-se o período em comum de 1993 a 2015, com menores quantidade de falhas. Assim, foram

calculadas as médias mensais das vazões, e realizada a caracterização geográfica das vazões (Quadro 3.29).

Este procedimento foi realizado com o objetivo de aproveitar a maior quantidade possível de dados em comum das séries de dados de vazões para caracterizar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica.

Quadro 3.29 – Quantidades de dados médios mensais das 5 estações fluviométricas utilizadas na caracterização das vazões (1993 - 2015).

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
S.J.L	20	19	18	20	17	17	19	19	19	18	18	18
S.M	20	19	18	20	17	17	19	19	19	18	18	18
U.P	19	19	18	19	17	17	19	18	19	18	18	18
Murici	21	19	19	21	18	18	20	20	19	19	18	18
FBF	21	19	19	21	18	18	20	20	19	19	18	18

S.J.L: São José da Laje; S.M: Santana do Mundaú; U.P: União dos Palmares; FBF: Fazenda Boa Fortuna.

3.3.1.2 Ensaios estatísticos entre as estações hidrométricas para dados mensais

Definido o período da série recorreu-se aos dados das 5 estações fluviométricas, com o objetivo de analisar a relação do comportamento hidrológico das vazões nos diferentes canais de drenagens e setores da bacia hidrográfica. Assim, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) entre as séries de vazão comparando-as no sentido de montante – jusante, a fim de determinar a relação entre os dados das estações fluviométricas.

Para tanto, os ensaios estatísticos entre as estações fluviométricas foram realizados a partir da comparação entre os meses de maiores vazões, que corresponderam, no período analisado, aos meses de junho, julho e agosto.

Dessa maneira, a partir dos ensaios estatísticos entre as estações Santana do Mundaú e São José da Laje, pode observar que o coeficiente R^2 é forte no mês de junho, moderado em julho e mais baixo em agosto (Figura 3.24).

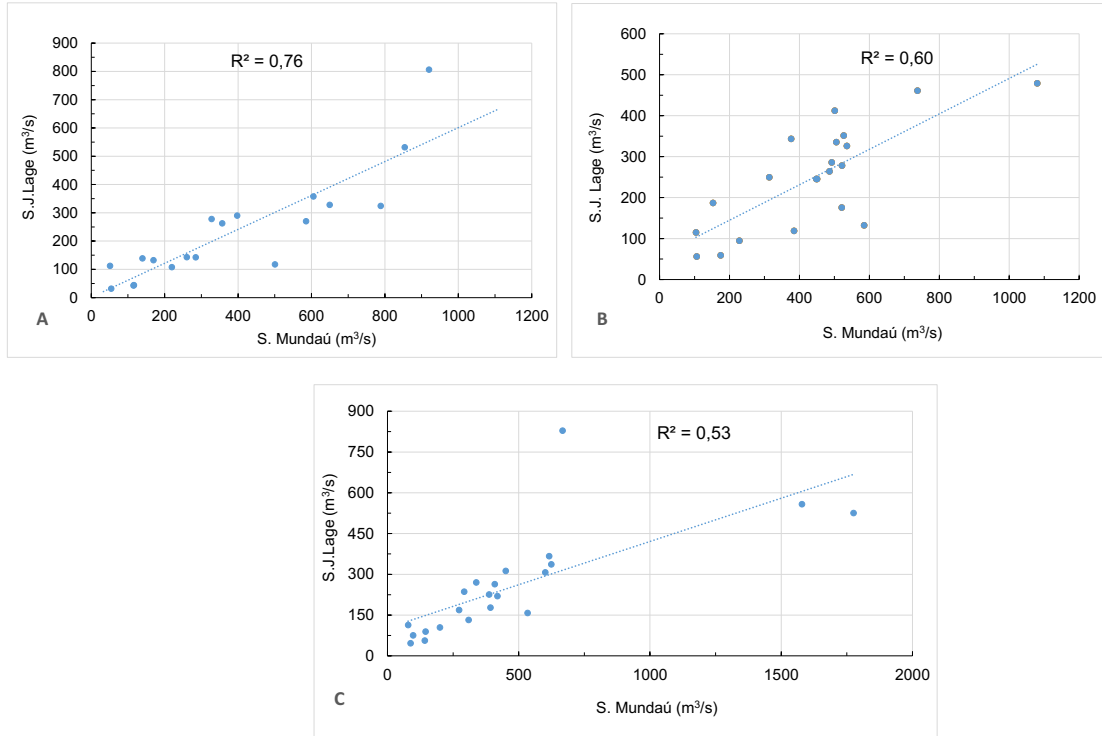


Figura 3.24 – Relação entre as estações fluviométricas de Santana do Mundaú e de São José da Lage, nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).

Na sequência, comparou-se as vazões médias mensais das estações União dos Palmares e Santana do Mundaú e o R^2 mostrou forte associação nos meses junho e julho, e moderada em agosto (Figura 3.25). Desse modo, o comportamento das vazões médias mensais entre os dois trechos de drenagens fluviais apresentou relação em mais de 75 % dos dados de vazão em junho e julho.

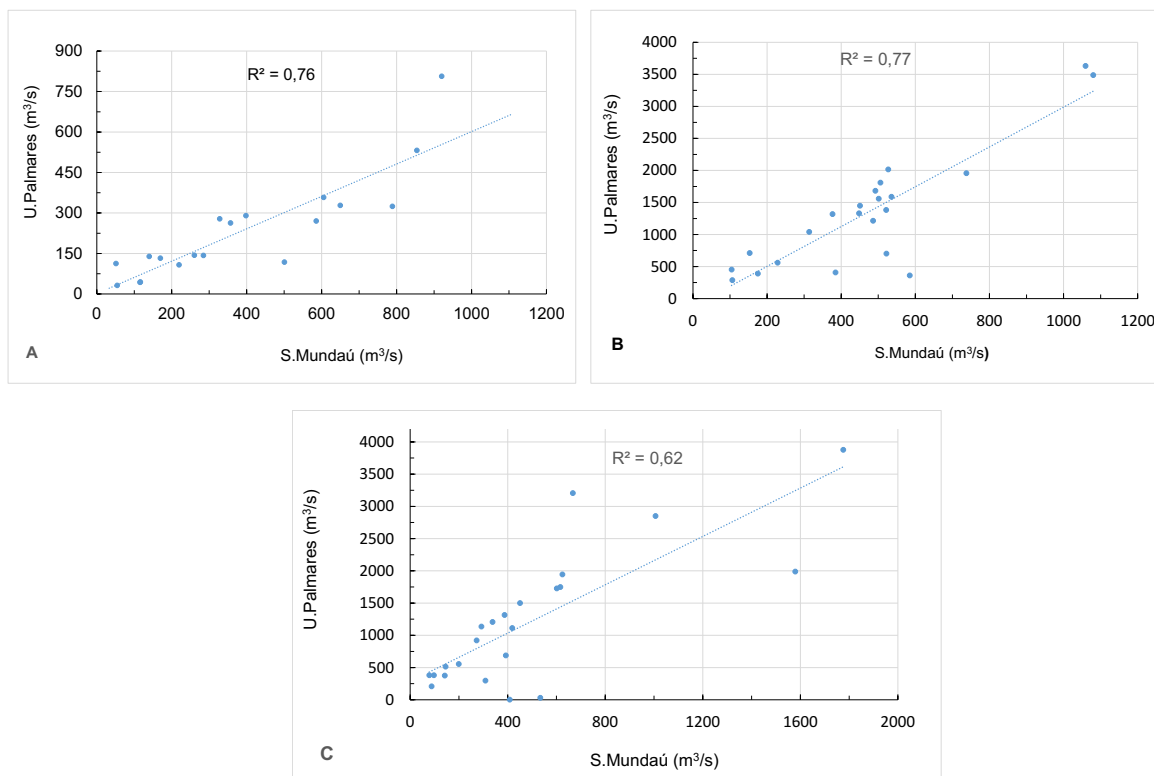


Figura 3.25 – Relação entre as estações fluviométricas de União dos Palmares e de Santana do Mundaú nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).

A análise do R^2 das estações fluviométricas de São José da Laje e União dos Palmares mostrou forte relação nas vazões no período húmido (junho, julho e agosto). O mês de junho apresentou maior R^2 (0,85) e constata-se a semelhança no comportamento hidrológico, nesses meses, nos dois trechos de drenagens fluviais comparados (Figura 3.26).

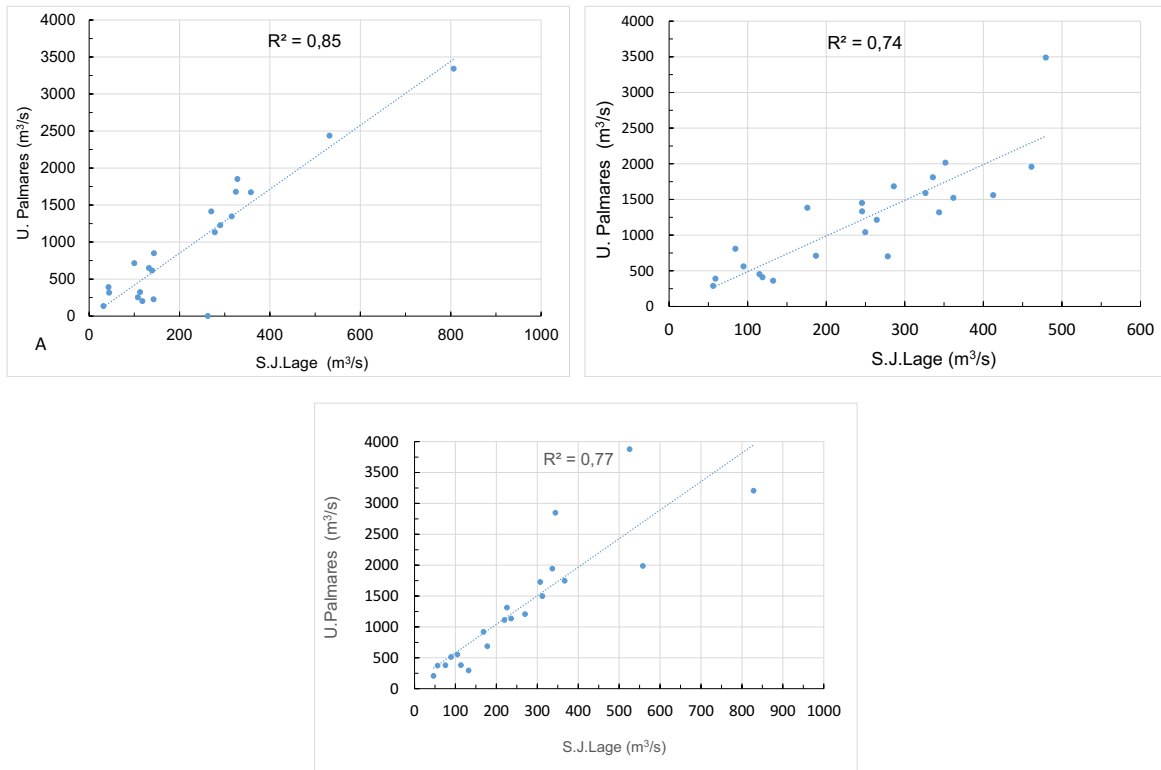


Figura 3.26 – Relação entre as estações fluviométricas de São José da Lage e União do Palmares nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).

Os coeficientes de determinação entre os dados das estações fluviométricas União dos Palmares e Murici - Ponte são moderados nos meses de junho e julho, mas menores no mês de agosto (Figura 3.27). Esta situação confirma, como seria de esperar, a relação relativamente forte entre as vazões ao longo deste trecho do rio Mundaú.

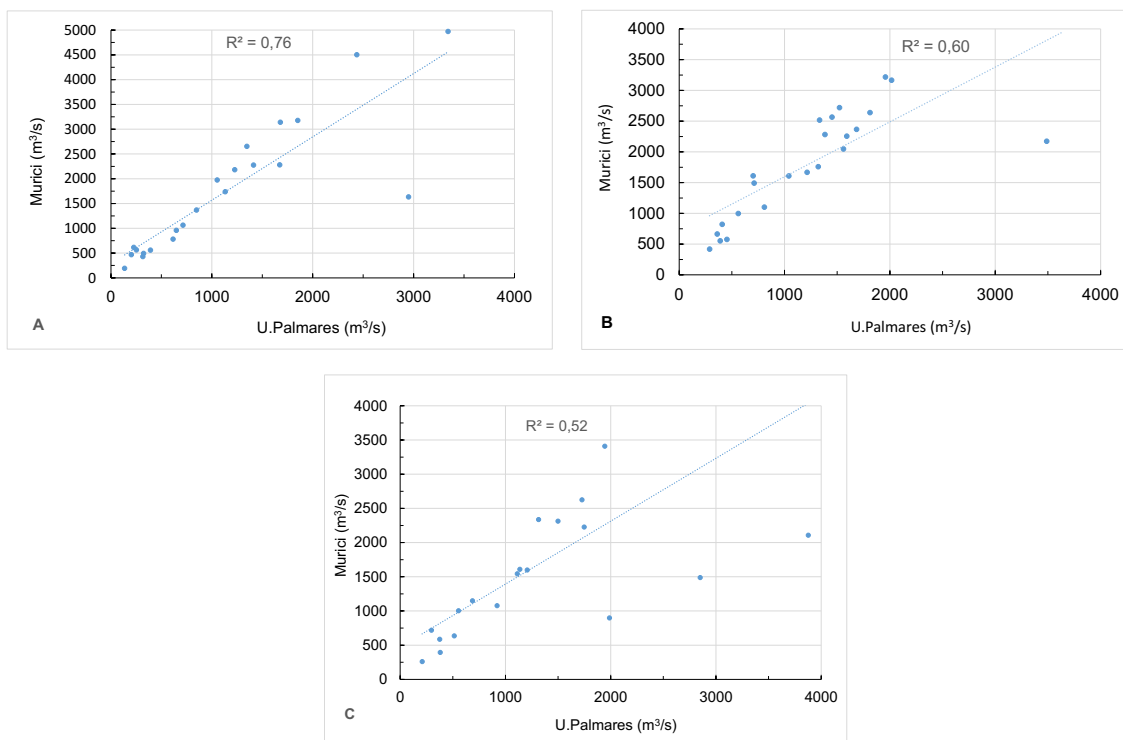


Figura 3.27 – Relação entre as estações fluviométricas de Murici - Ponte e União do Palmares nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).

Dentre os ensaios estatísticos realizados entre as estações fluviométricas, foram as estações Murici - Ponte e Fazenda Boa Fortuna, situadas no setor inferior do rio Mundaú, que apresentaram maior associação das vazões, principalmente nos meses de junho ($R^2 = 0,98$) (Figura 3.28).

Dos resultados alcançados pelos ensaios estatísticos obtidos pelos coeficientes de determinação, as estações fluviométricas Murici - Ponte e Fazenda Boa Fortuna, no período analisado, mostraram as maiores associações de vazões, com valores de R^2 superiores a 0,8.

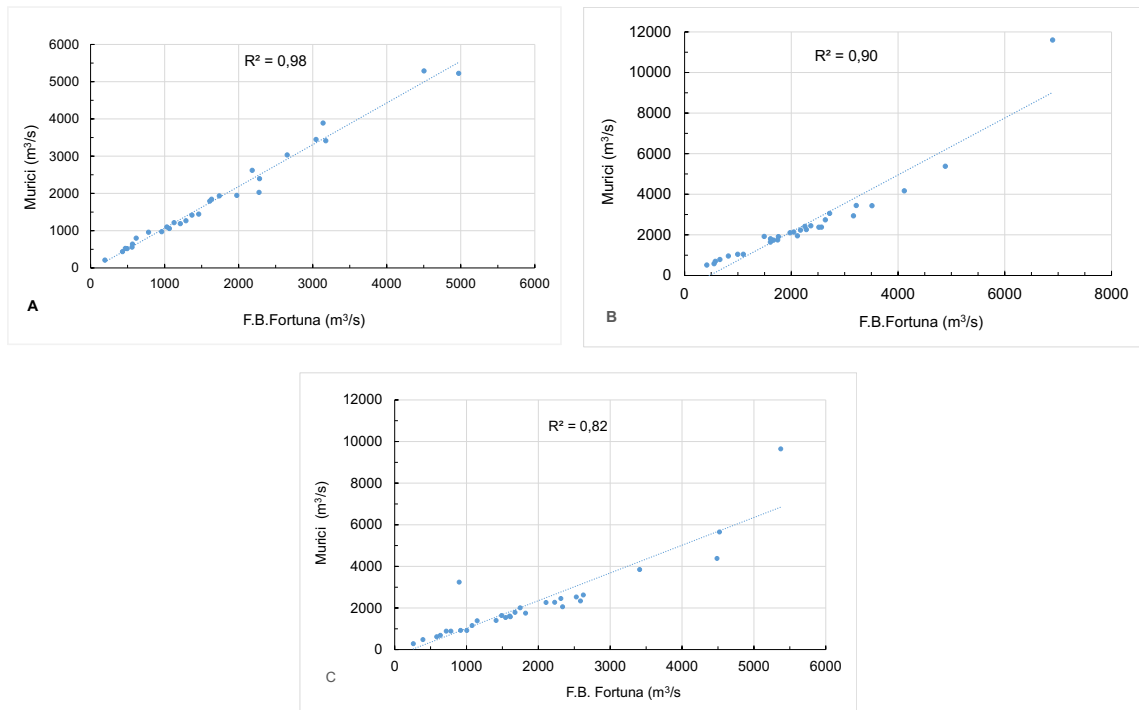


Figura 3.28 – Relação entre as estações fluviométricas de Murici e de Fazenda Boa Fortuna nos meses de junho (A), julho (B) e agosto (C).

3.3.2 Análise espacial e temporal das vazões na bacia hidrográfica

3.3.2.1 Dados fluviométricos médios mensais

Com o intuito de conhecer e analisar o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do rio Mundaú, calculou-se os valores médios mensais das vazões das estações fluviométricas no período 1993 a 2015 (Quadro 3.30).

Ao observar os dados constatou-se que o trimestre de junho a agosto corresponde ao período de maiores vazões registradas nas estações, e os meses de outubro a abril apresentaram, em média, menores valores de vazão. Os meses de maio e setembro apresentam valores intermédios e são meses de transição entre os períodos de menores e maiores vazões (Figura 3.29).

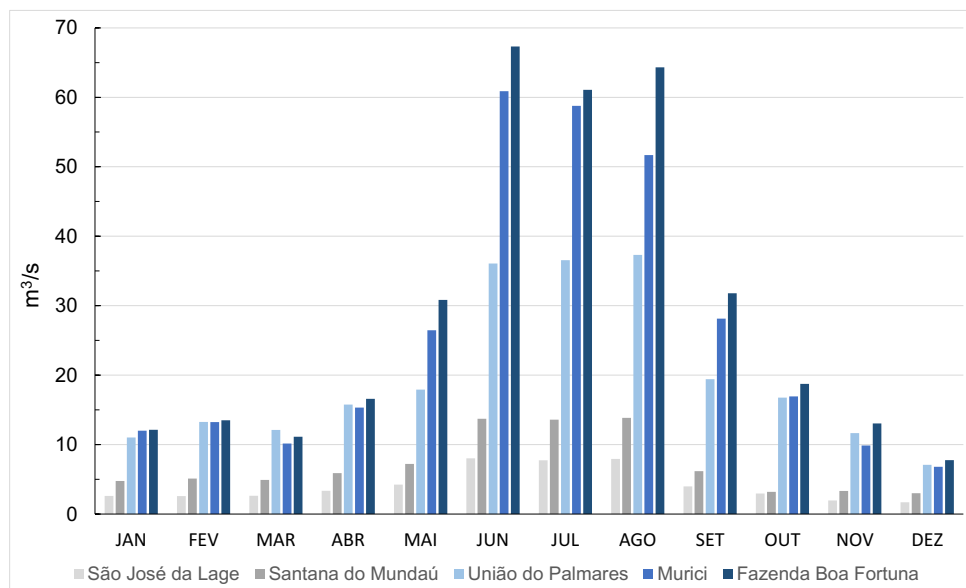


Figura 3.29 – Vazão média mensal nas estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Mundaú (1993 – 2015).

Na sequência, foi realizada a comparação entre as vazões das estações do setor intermédio (Santana do Mundaú e São José da Laje) e entre as estações da metade inferior da bacia hidrográfica (União dos Palmares/Murici e Murici/Fazenda Boa Fortuna). Se observa que as estações Santana do Mundaú e São José da Laje, situadas no setor intermédio da bacia hidrográfica, e localizadas em canais de drenagens e sub-bacias diferentes, apresentam diferenças relevantes nas vazões médias mensais. Assim, a estação de Santana do Mundaú, de menor área de drenagem, apresentou maior vazão média específica ($0,0093 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) do que a estação São José da Laje, que possui maior área de drenagem. Isto permite constatar que na metade montante da bacia hidrográfica, o setor norte/nordeste é mais seco do que o setor sudoeste.

Constata-se esta diferença, também, a partir da vazão média específica da estação União dos Palmares ($0,0067 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), menor do que a da estação Murici - Ponte ($0,0079 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$). Isto mostra que há uma relação muito próxima entre as vazões médias anuais e área de drenagem das sub-bacias, mas também que a disponibilidade do escoamento superficial na bacia hidrográfica vai aumentando ligeiramente de montante para jusante.

No setor jusante no rio Mundaú, observou-se na estação Murici - Ponte na maior parte dos meses valores de vazões médias mensais semelhantes aos registrados na estação União dos Palmares, situada a montante.

Quadro 3.30 – Vazões médias mensais (m³/s) e diferença relativas das estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Mundaú (1993 a 2015).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Media
SM	4,8	5,1	4,9	5,9	7,2	13,7	13,6	13,8	6,2	3,2	3,3	3,0	7,1
SJL	2,6	2,6	2,6	3,3	4,2	8,0	7,7	7,9	4,0	3,0	2,0	1,7	4,1
Dif	2,2	2,5	2,3	2,5	3,0	5,7	5,9	5,9	2,2	0,2	1,4	1,3	3
Dif	45,4	49,2	46,6	43,2	41,2	41,5	43,1	42,7	35,6	7,6	41,2	43,8	42,3
SJL	2,6	2,6	2,6	3,3	4,2	8,0	7,7	7,9	4,0	3,0	2,0	1,7	4,1
UP	11,0	13,3	12,1	15,8	17,9	36,1	36,5	37,3	19,4	16,8	11,6	7,1	19,6
Dif	8,4	10,7	14,7	12,5	13,7	28,1	28,8	29,4	15,4	13,8	9,6	5,4	15,5
Dif	76,4	80,5	78,3	78,8	76,3	77,8	78,9	78,7	79,6	82,4	83,2	76,2	79
UP	11,0	13,3	12,1	15,8	17,9	36,1	36,5	37,3	19,4	16,8	11,6	7,1	19,6
Mu	12,0	13,2	10,2	15,3	26,5	60,9	58,8	51,7	28,1	16,9	9,9	6,8	25,9
Dif	1,0	0,0	2,0	0,4	8,5	24,8	22,2	14,4	8,7	0,2	1,8	0,3	6,3
Dif	9,0	0,2	16,1	2,8	47,7	68,8	60,8	38,5	45,0	1,1	15,3	4,2	24,3
Mu	12,0	13,2	10,2	15,3	26,5	60,9	58,8	51,7	28,1	16,9	9,9	6,8	25,9
FBF	12,1	13,5	11,1	16,6	30,8	67,3	61,1	64,3	31,8	18,7	13,0	7,8	29,0
Dif	0,1	0,3	1,0	1,3	4,4	6,4	2,3	12,6	3,7	1,8	3,2	1,0	3,1
Dif	0,9	2,0	9,6	8,2	16,5	10,6	3,9	24,4	13,0	10,7	32,1	14,7	12

Estações: Santana do Mundaú (SM); São José da Lage (SJL); União do Palmares (UP); Murici - Ponte (Mu); Fazenda Boa Fortuna (FBF). Dif: Diferença.

E quanto à comparação entre as estações fluviométricas de Murici - Ponte e Fazenda Boa Fortuna, observou-se pela média mensal o comportamento hidrológico praticamente idêntico, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. Esta associação do regime hidrológico no setor inferior do rio Mundaú é constatada com a proximidade dos valores das vazões médias específicas das estações Murici - Ponte (0,0079 m³/s/km²) e Fazenda Boa Fortuna (0,0082 m³/s/km²).

Ainda assim, as vazões médias mensais da estação fluviométrica da Fazenda Boa Fortuna no período analisado de 1993 a 2015 foram maiores em todos os meses do ano do que as da estação Murici (Quadro 3.30).

3.3.3 Principais eventos de inundações fluviais ocorridos na bacia hidrográfica do rio Mundaú

Realizada a caracterização da fluviometria média mensal, buscou-se na sequência descrever as principais e as mais danosas inundações fluviais que afetaram as cidades ribeirinhas na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Nesse sentido, buscou-se o histórico dos eventos de inundações fluviais a partir de revisões bibliográficas em artigos científicos, jornais e registros de ocorrência de inundações fluviais *in situ* e também em documentos de Avaliação de Danos - Avadan e Notificação Preliminar de Desastres – Nopred disponível *online* no banco de dados do S2iD – Sistema Integrado de Informação Sobre Desastres do Ministério de Integração Nacional do Brasil da Defesa Civil Nacional. Assim, foram identificadas as grandes inundações fluviais ocorridas na área de estudo (Quadro 3.31).

A identificação das inundações fluviais de 1914 e 1941 e o quantitativo das perdas e dos danos das inundações fluviais de 1969, 1988 e 1989 foi descrito de acordo com Fragoso *et al.* (2010). Pelo que não foi encontrado dados dos danos físicos e humanos das inundações fluviais de 1914 e 1941 nos municípios da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Em complemento aos registros das inundações fluviais recorreu-se aos dados da plataforma *Reanalysis da National Oceanic Atmospheric Administration – NOAA/ESRL Physical Sciences Division (PSD)*, à exceção da inundação fluvial de 1914, em que a indisponibilidade de dados não permitiu identificar espacialmente os setores de atuação da precipitação que ocasionaram essa inundação fluvial.

Os dados *Reanalysis* utilizados nesta caracterização das inundações fluviais correspondem aos desenvolvidos para América do Sul, onde as células com valores de precipitação incorporam um conjunto de dados das estações pluviométricas da América do Sul (Quadro 3.32), pelo que são valores médios de precipitação nas células (Liebmann & Allured, 2005). A precipitação nas células é

calculada pela média simples num raio específico para cada célula, dado o peso igual a 0,75 vezes a resolução do mapa (*Grid*).

Estes dados possuem lacunas na linha de costa devido à ausência de estações de medições de chuvas nos oceanos, onde os satélites são as fontes de dados para preencher estas lacunas de dados. A partir dos dados *Reanalysis* foi possível caracterizar a distribuição espacial das precipitações que causaram as inundações fluviais ocorridas em 1941, 1949 e 1975 assim como as de 2000, 2004 e 2010, descritas a seguir (Quadro 3.31).

Quadro 3.31 – Registros de ocorrências de inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Rios	Município	Fonte	Data
-	-	Meio eletrônico, Jornais e artigos	1914
Canhoto e Mundaú	SJL, U P, Mu e R L	Jornal: A Noite, Rio de Janeiro	05/03/1941
Canhoto e Mundaú	SJL, UP, Mu e Bran	Jornal eletrônico História de Alagoas	19/05/1949
Canhoto	SJL	Monumento com registro	14/03/1969
Mundauzinho	SM	Comissão Externa do Senado Federal do Brasil, 2000	17/07/1975
-	-	Dados hidrológicos e meio eletrônico	18/07/1988
Canhoto e Mundaú	SJL, UP, Mu, RL	Decreto 33.523 de 12/06/1989 do Governo de Alagoas	13/06/1989
Mundauzinho, Canhoto e Mundaú	SM, SJL, UP, Mu, Bran e RL.	Decreto 02/08/2000	01/08/2000
Canhoto	SJL	Nopred	15/01/2004
Canhoto e Mundaú	SJL, UP, Mu, Bran, RL	Meio eletrônico, Jornais e artigos	18 e 19/06/2010

São José da Lage (SJL); Santana do Mundaú (SM); União do Palmares (UP); Mu:Murici; Bran:Branquinha; RL: Rio Largo.

Quadro 3.32 – Caracterização dos dados de precipitação South America Precipitation Reanalysis da National Oceanic Atmospheric Administration.

Precipitação	Unidade	Células	Nº de estações	Nº dados das estações	Escala supranacional
Diária	mm	1 x 1°	7900	10 168	América do Sul

a) Evento de inundação fluvial no dia 5 de março de 1941

Em relação ao registro de ocorrência em 1941, buscou-se os dados das estações pluviométricas para identificar a precipitação que proporcionou essa inundação fluvial. Nesse sentido, analisou-se dados de precipitação e vazão diários em alguns dias antes da inundação fluvial através de métodos gráficos e, assim, identificou-se o período e os quantitativos que provocaram a inundação fluvial no dia 5 de março de 1941, a partir dos dados diários das estações pluviométricas de Garanhuns e Correntes. Buscou-se também a espacialização da precipitação na plataforma de dados de *Reanalysis da National Oceanic atmospheric Administration – NOAA/ESRL PSD* e assim realizou-se a confirmação espacial do evento de inundação fluvial.

A reanálise da precipitação mostrou que o mecanismo pluviogénico já atuava no dia 4 de Março com precipitações da ordem de 15 a 22 mm (Figura 3.30), tendo se deslocado de leste para oeste e, no dia 5 de Março, os valores crescem para 25 a 30 mm, afetando com mais intensidade o setor montante da bacia hidrográfica, contribuindo para o desencadeamento da inundação fluvial (Figura 3.31).

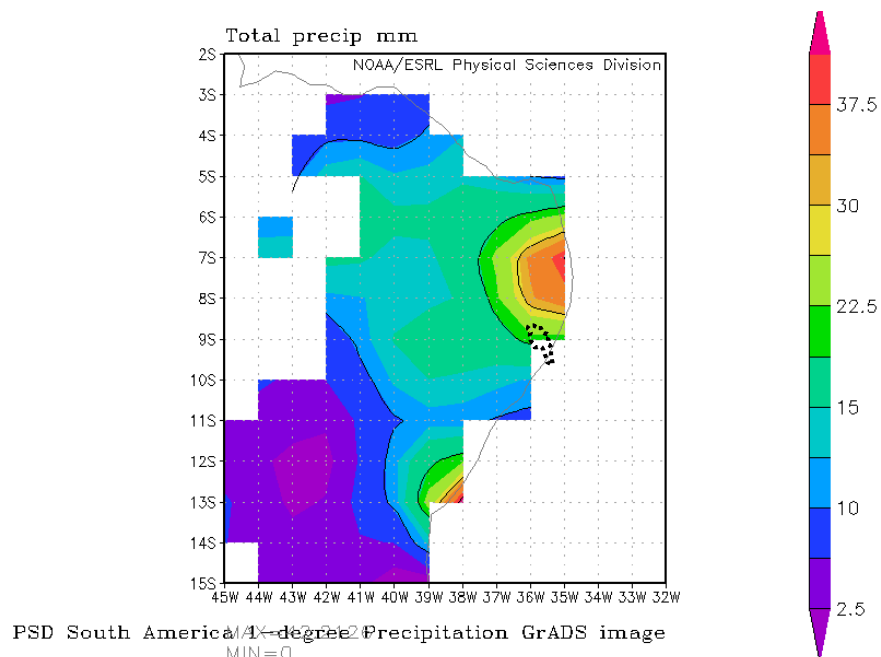


Figura 3.30 – Precipitação (mm) em 4/03/1941 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

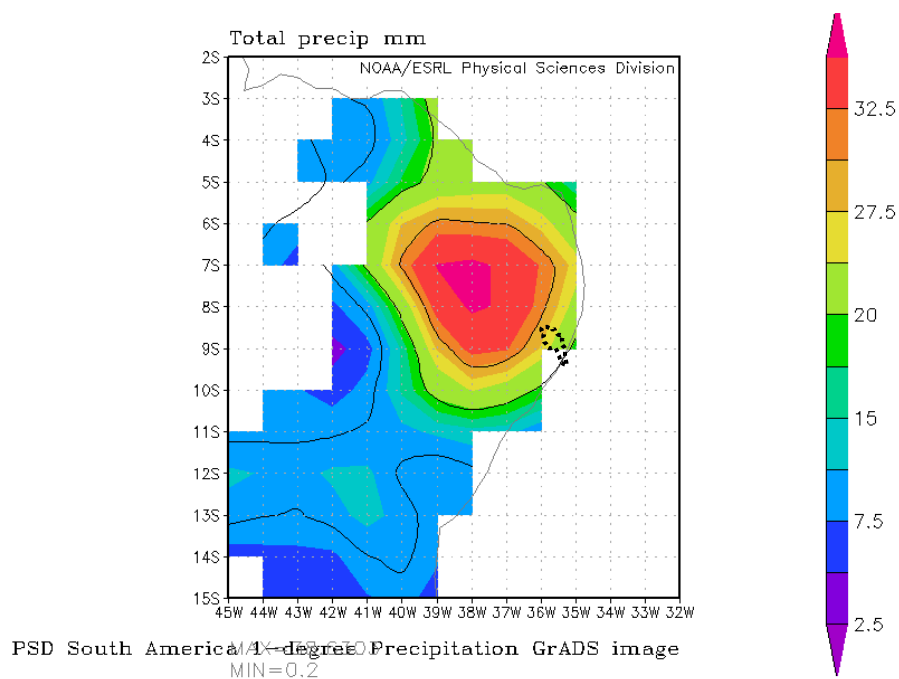


Figura 3.31 – Precipitação (mm) em 5/03/1941 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

b) Evento de inundação fluvial no dia 19 de maio de 1949

Em maio de 1949 foi noticiado nos meios de comunicação “A tromba d’água de 1949 em Maceió” provocada por fortes precipitações ocorridas nos dias 16 a 19 de maio, evento este que atingiu a região nordeste do Brasil¹. O nível do rio Mundaú teve sua elevação máxima no dia 19 de maio de 1949, atingindo as populações ribeirinhas dos municípios: São José da Lage, União dos Palmares, Branquinha e Murici.

Com a espacialização da precipitação através de reanálises caracterizou-se a precipitação ocorrida nos dias 16 a 19 de maio de 1949. Assim, no dia 16 de maio observa-se a precipitação acima de 25 mm (Figura 3.32); no dia 17 a precipitação se intensifica ainda mais e, no dia 17 ao 18, o fenômeno ganha mais força sobre o setor montante, intermédio e, a jusante, onde a precipitação foi mais intensa acima dos 57,5 mm (Figuras 3.33, 3.34 e 3.35); no dia 18 de maio, a precipitação se intensifica nos setores intermédio e jusante e, no dia seguinte, 19 de maio, o sistema de precipitação permanece e supera os 32,2 mm nos setores montante e jusante e desencadeia a inundação fluvial na bacia hidrográfica (Figuras 3.36 e 3.37).

¹ <http://www.historiadealagoas.com.br/a-tromba-dagua-de-1949.html>

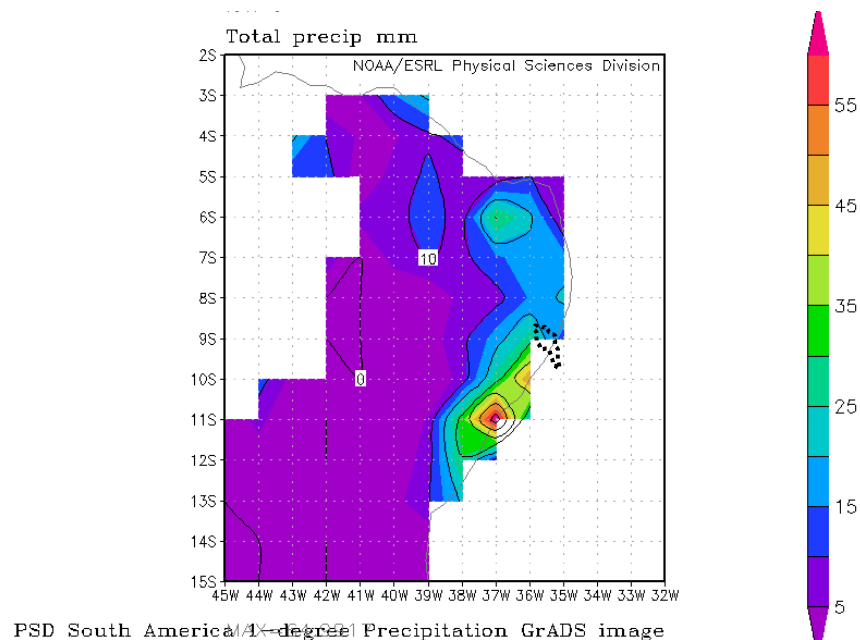


Figura 3.32 – Precipitação (mm) em 16/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

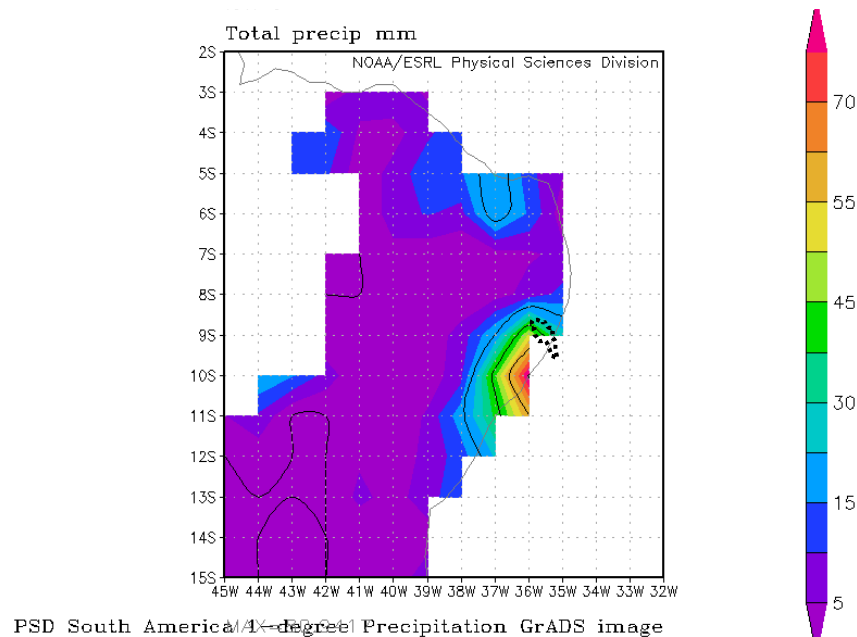


Figura 3.33 – Precipitação (mm) em 17/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

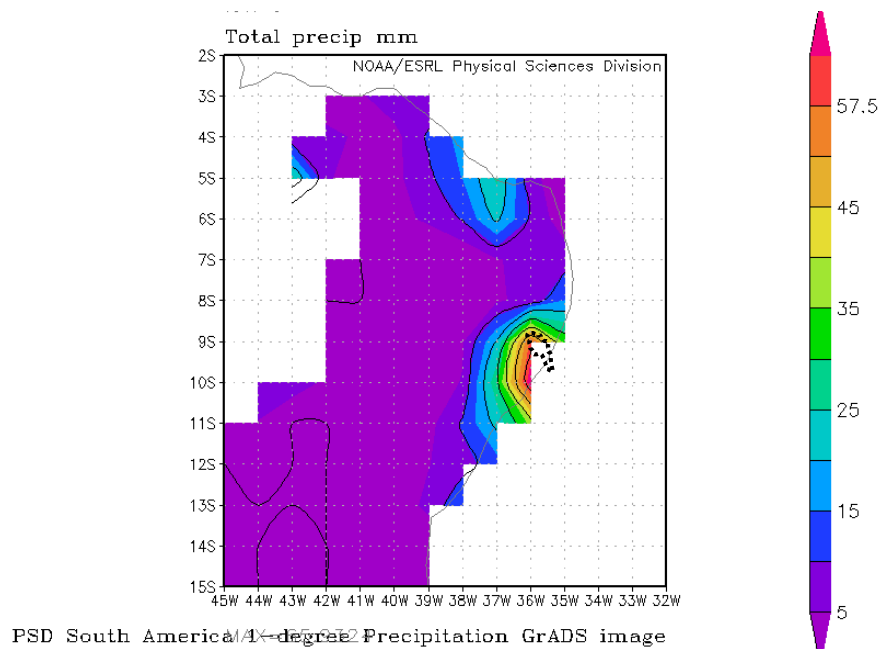


Figura 3.34 – Precipitação (mm) em 17/05/1949 a 18/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

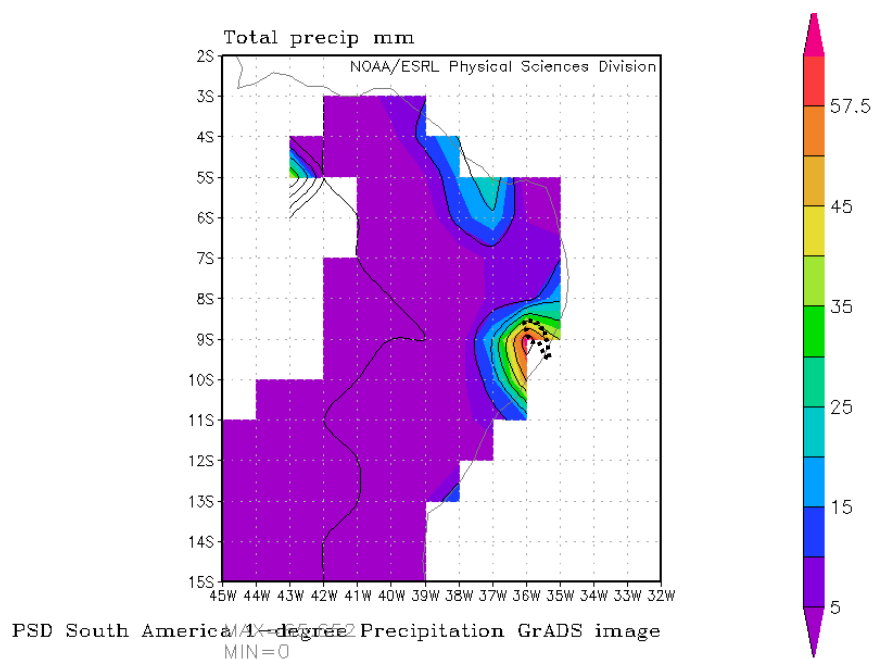


Figura 3.35 – Precipitação (mm) em 17/05/1949 a 18/05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

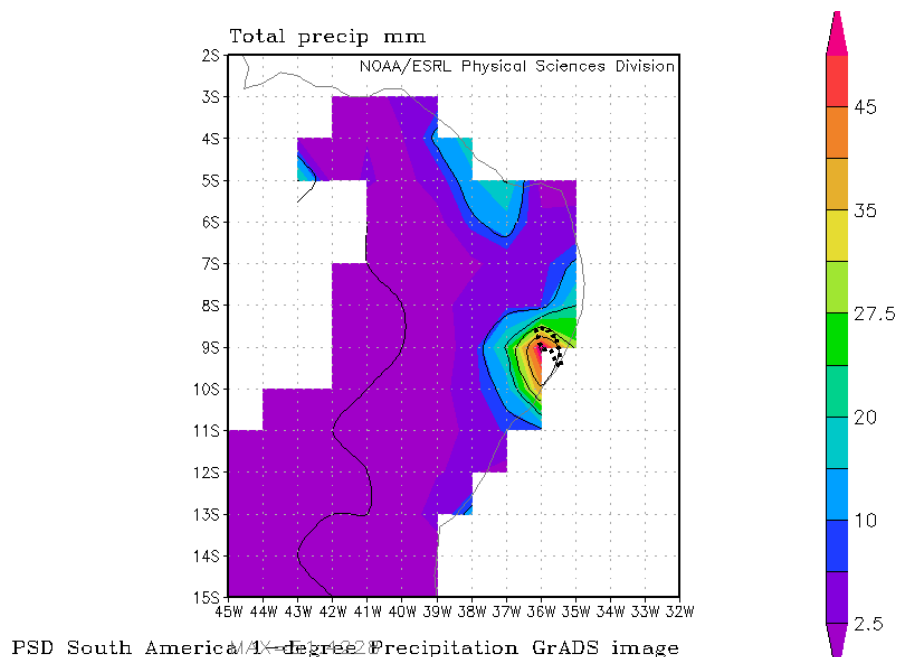


Figura 3.36 – Precipitação (mm) em 18 a 19 /05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

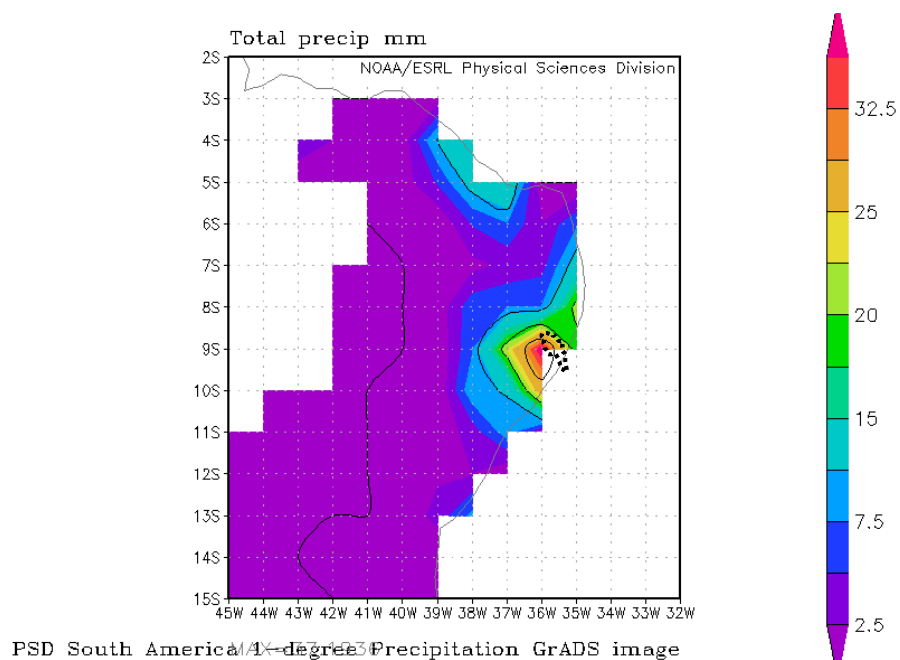


Figura 3.37 – Precipitação (mm) em 19 /05/1949 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

c) Evento de inundação fluvial no dia 14 de março de 1969

No dia 14 de março de 1969 ocorreu outra grande inundação fluvial que atingiu fortemente a cidade de São José da Lage (Figura 3.38). Essa se deu após a festa do padroeiro daquela cidade, São José, onde o nível do rio Canhoto subiu de forma rápida e silenciosa. Eram por volta das 2h da manhã quando os cerca de 12 mil moradores à época se depararam com uma cidade completamente inundada².

A inundação fluvial de 1969 foi a que matou mais pessoas, cerca de 1100 mortes em pouco mais de 4 horas. No município de São José da Lage, somente nesta cidade, nestas poucas horas, cerca de 400 pessoas morreram, 1200 casas foram destruídas e mais de 10 000 pessoas ficaram desabrigadas. Na época, os prejuízos foram avaliados em, aproximadamente, 30 milhões de dólares (Fragoso Júnior *et. al.*, 2010).

² <http://noticias.uol.com.br>

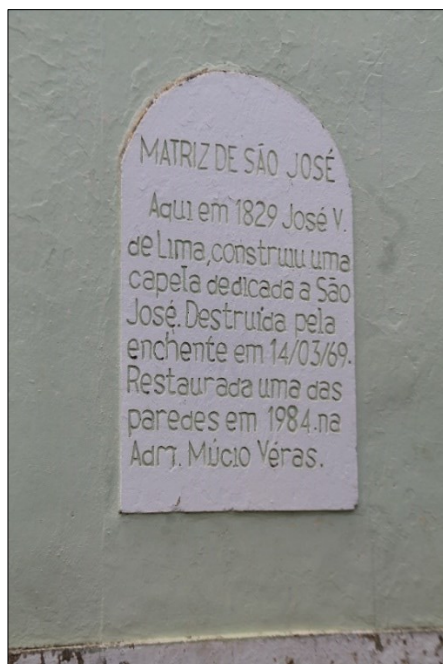


Figura 3.38 – Monumento de registro da inundação fluvial in situ, localizado num ponto atingido pela cheia de 1969 no município de São José da Lage.

Ao analisar a figura 3.39 observa-se o mecanismo de precipitação no dia 13 de março, mais concentrado a sudoeste da bacia hidrográfica; no dia 14 se desloca para nordeste e se mantém no setor montante da bacia hidrográfica, dia do episódio da inundação fluvial, com precipitação acima de 32,5 mm (Figura 3.40). Neste evento de inundação fluvial, a precipitação permanece com maior concentração no setor montante da bacia hidrográfica.

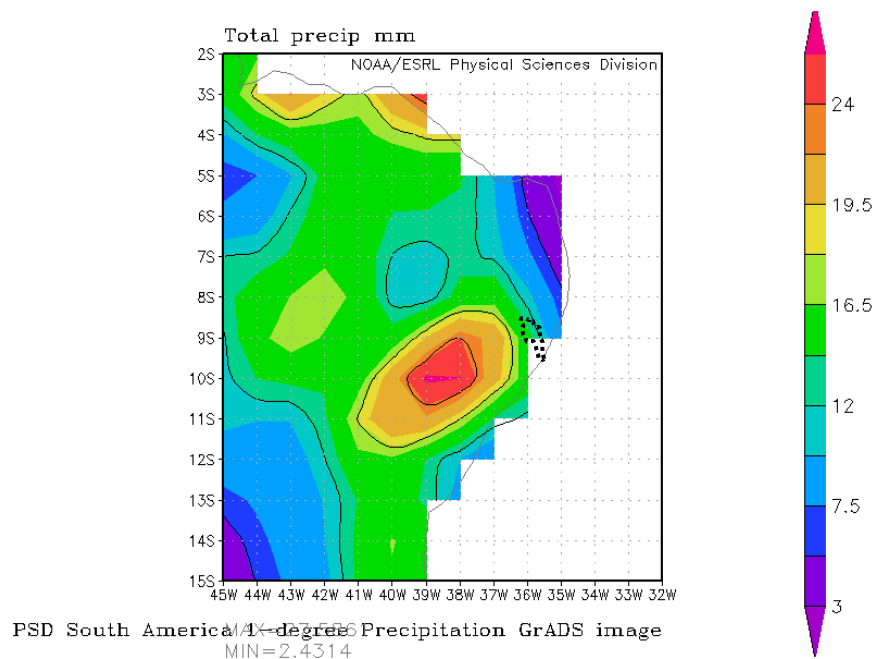


Figura 3.39 – Precipitação (mm) em 13/03/1969 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

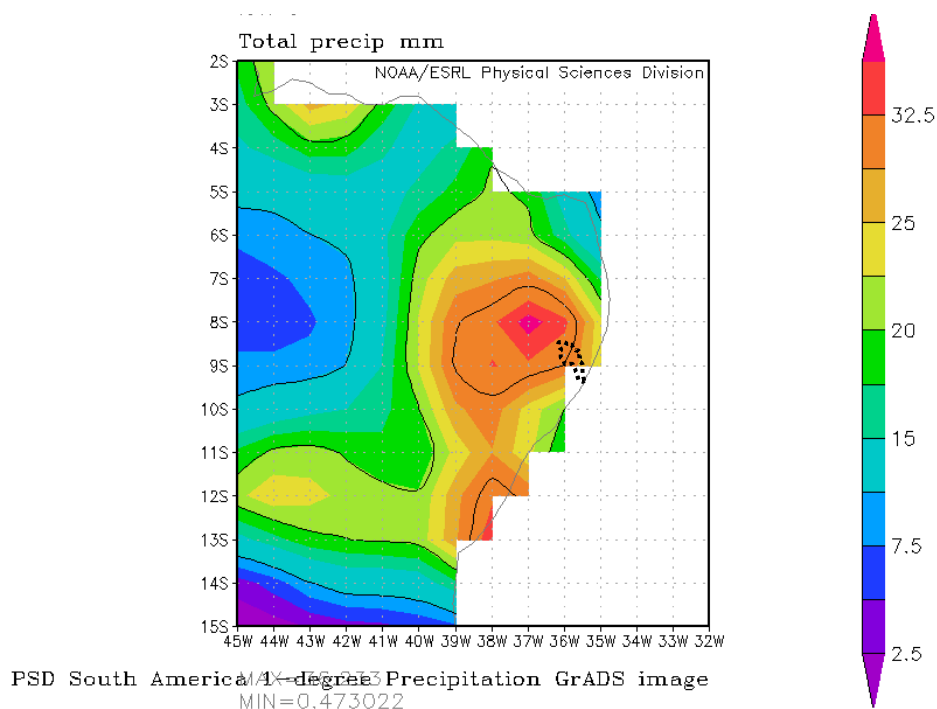


Figura 3.40 – Precipitação (mm) em 14/03/1969 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontilhada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

d) Evento de inundação fluvial no dia 17 julho de 1975

De acordo com a Comissão Externa do Senado Federal do Brasil no ano de 2000, houve inundação fluvial em julho de 1975, que atingiu terras agrícolas em Alagoas em 60 % das lavouras de fumo, milho e feijão. A infraestrutura rodoviária alagoana sofreu danos e a inundação fluvial no rio Mundaú havia espalhado um rastro de destruição que chegou até a Laguna Mundaú e deixou ao relento a população que residia em suas margens (Senado Federal, 2000).

Ao observar o mapa de precipitação percebe-se que a precipitação já ocorria há 6 dias antes do episódio da inundação fluvial e, no dia 15 de julho, a precipitação se concentra no setor intermédio e inferior da bacia hidrográfica (Figura 3.41) e aumenta no dia 16 de julho (Figura 3.42). No dia seguinte, 17 de julho, ocorre o episódio de inundação fluvial, associado à intensificação da precipitação no setor leste da bacia hidrográfica com valores de 37,5 a 47,5 mm (Figura 3.43).

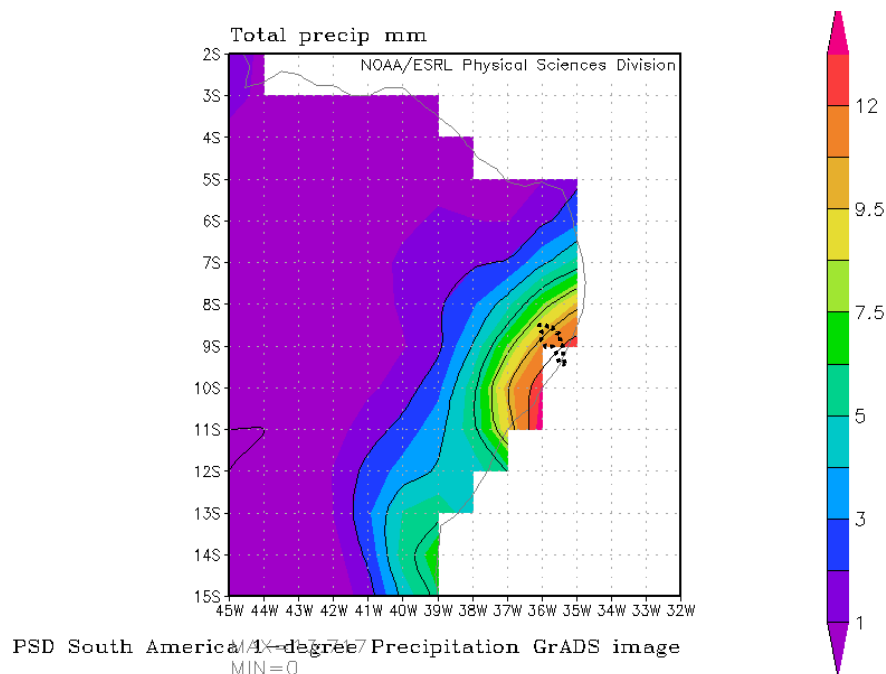


Figura 3.41 – Precipitação (mm) em 15/06/1975 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

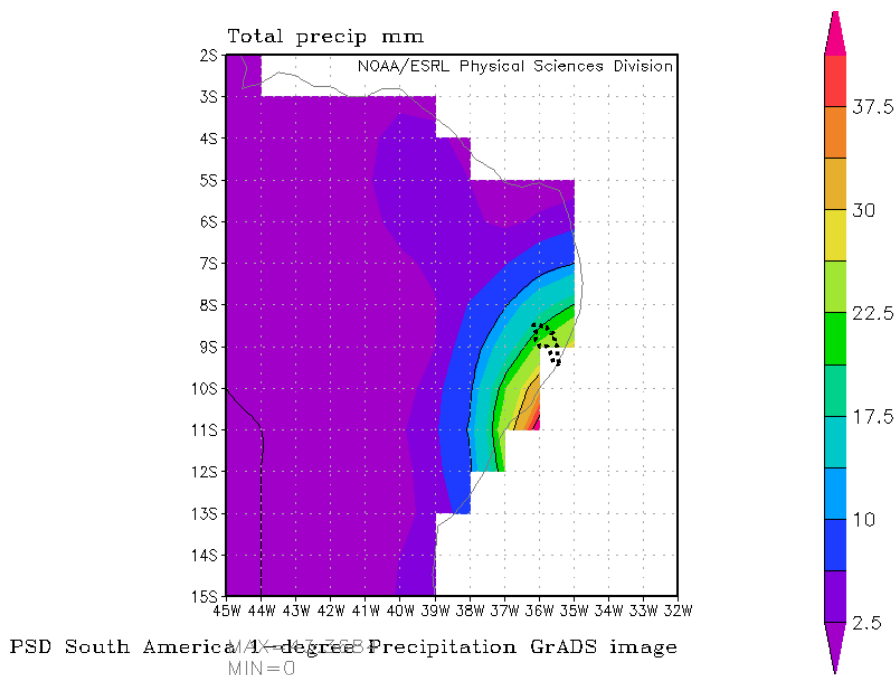


Figura 3.42 – Precipitação (mm) em 16/06/1975 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

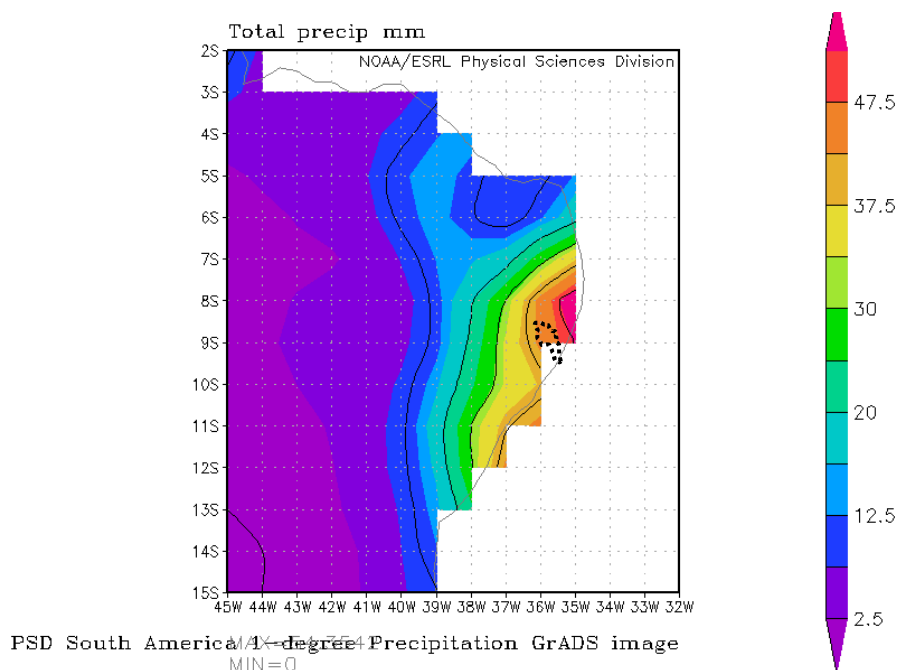


Figura 3.43 – Precipitação (mm) em 17/06/1975 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

e) Eventos de inundação fluvial em 18 julho de 1988

Em julho de 1988 é registrado mais um evento de inundação fluvial que atingiu 21 municípios do estado de Alagoas situados na bacia hidrográfica do rio Mundaú. Nesse episódio, foram registradas 9000 casas danificadas e 4000 destruídas. Nessa inundação fluvial, interromperam-se os serviços de abastecimento de água, de saúde, de educação e de energia elétrica, além dos danos provocados na infraestrutura viária.

A precipitação que ocasionou a inundação fluvial em julho de 1988 atuou com mais intensidade no setor intermédio e jusante da bacia hidrográfica nos dias 15 e 16 de julho (Figuras 3.44 e 3.45). No dia 17 de julho, a precipitação avança para o setor montante e intermédio com 15 mm e a jusante acima de 19 mm; no dia 18 de Julho, dia da inundação fluvial, a precipitação atua no setor intermédio acima

dos 15 mm e, para a jusante, com mais intensidade acima de 19 mm (Figuras 3.46 e 3.47).

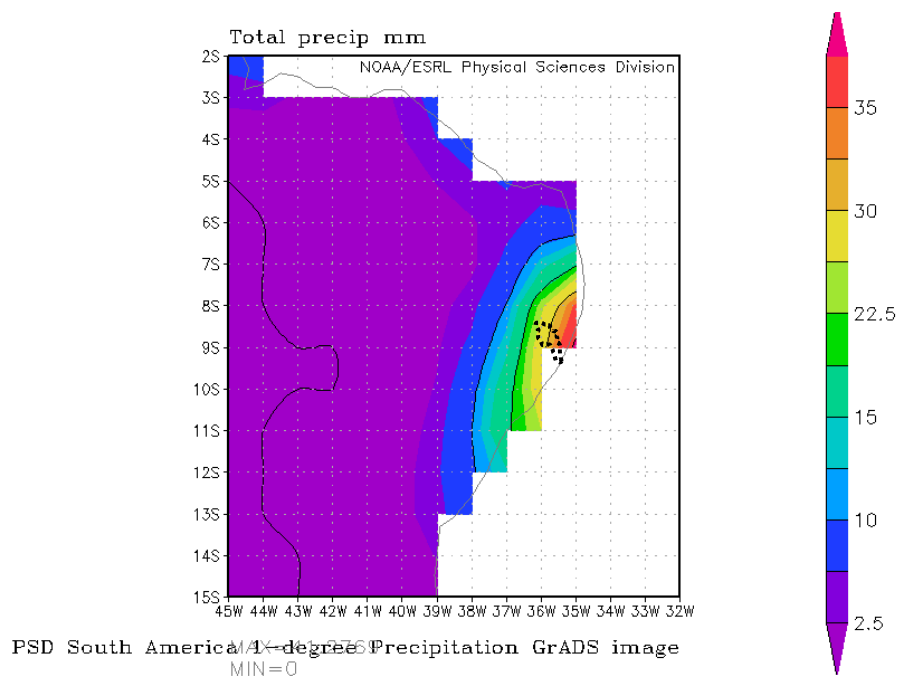


Figura 3.44 – Precipitação (mm) em 15/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

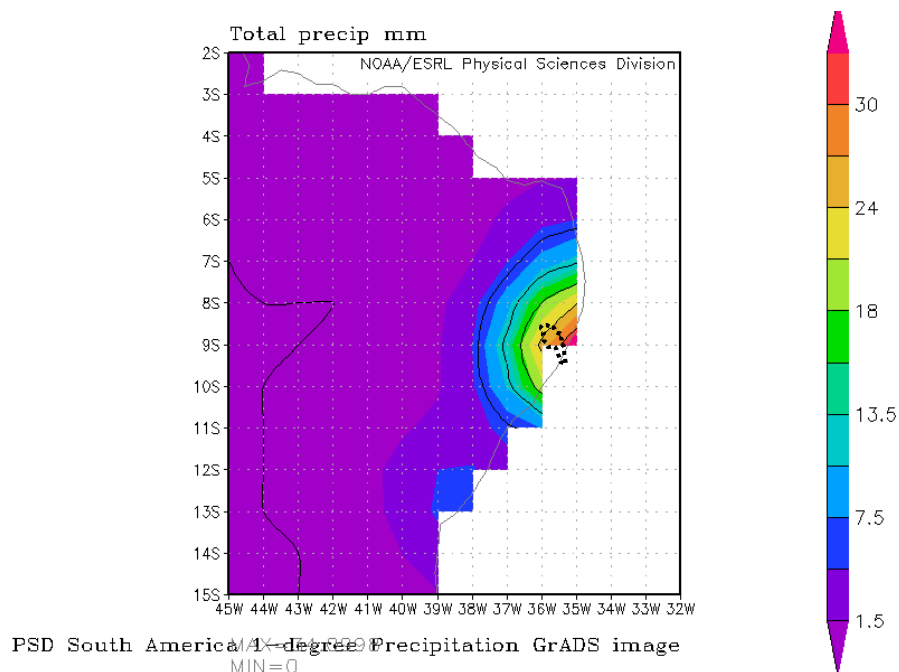


Figura 3.45 – Precipitação (mm) em 16/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

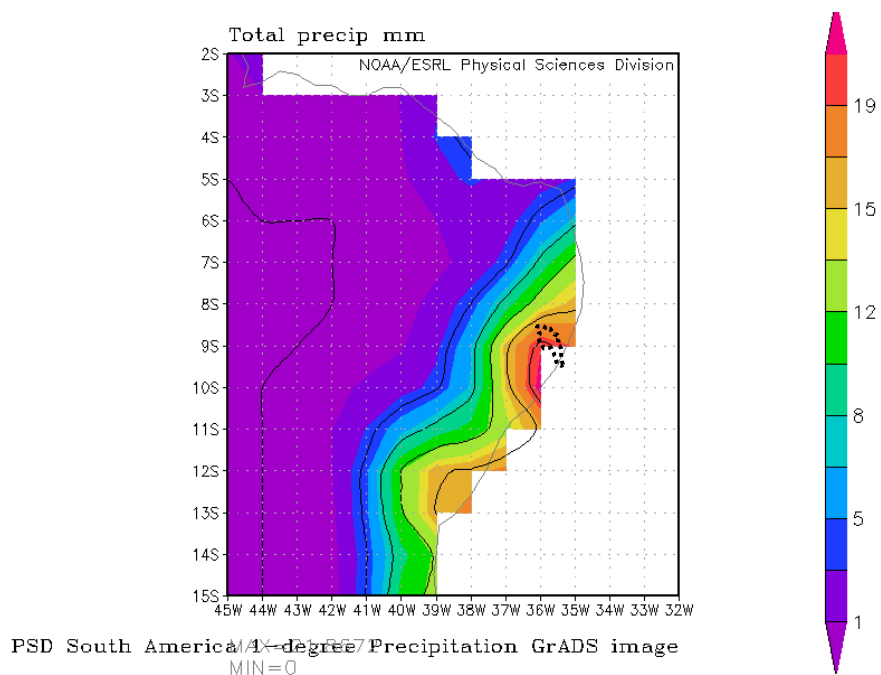


Figura 3.46 – Precipitação (mm) em 17/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

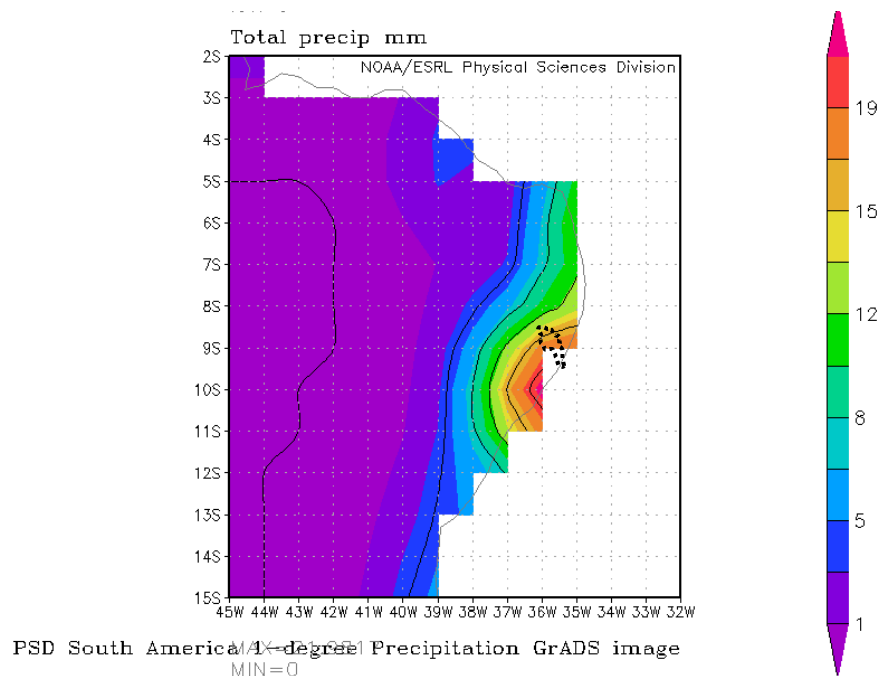


Figura 3.47 – Precipitação (mm) em 18/07/1988 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

f) Eventos de inundação fluvial em 13 maio de 1988

No ano a seguir, em julho de 1989, o fenômeno de inundação fluvial se repete com maior intensidade atingindo 17 dos 21 municípios que constituem a bacia hidrográfica do rio Paraíba (a oeste da bacia do rio Mundaú) e do rio Mundaú. Na ocasião, 14 600 casas foram atingidas, das quais 6 700 totalmente destruídas. O sistema viário foi extremamente afetado, sendo as principais estradas atingidas (rodovias AL 101, 210 e 220 e a BR101, 104 e 316). Nesse evento, as vias urbanas, dezenas de prédios públicos e praças, foram fortemente atingidos e os custos estimados para a reconstrução da região foram de 200 milhões de dólares (Andrade & Procópio, 1989).

Assim, ao observar a espacialização da precipitação, constata-se que nos dias 11 e 12 de julho aquela já estava no setor próximo à foz acima de 10,5 mm (Figuras 3.48 e 3.49). No dia do evento da inundação fluvial, 13 de junho, a precipitação

ocorre com mais intensidade em toda a área bacia hidrográfica e ultrapassa 12,5 mm (Figura 3.50).

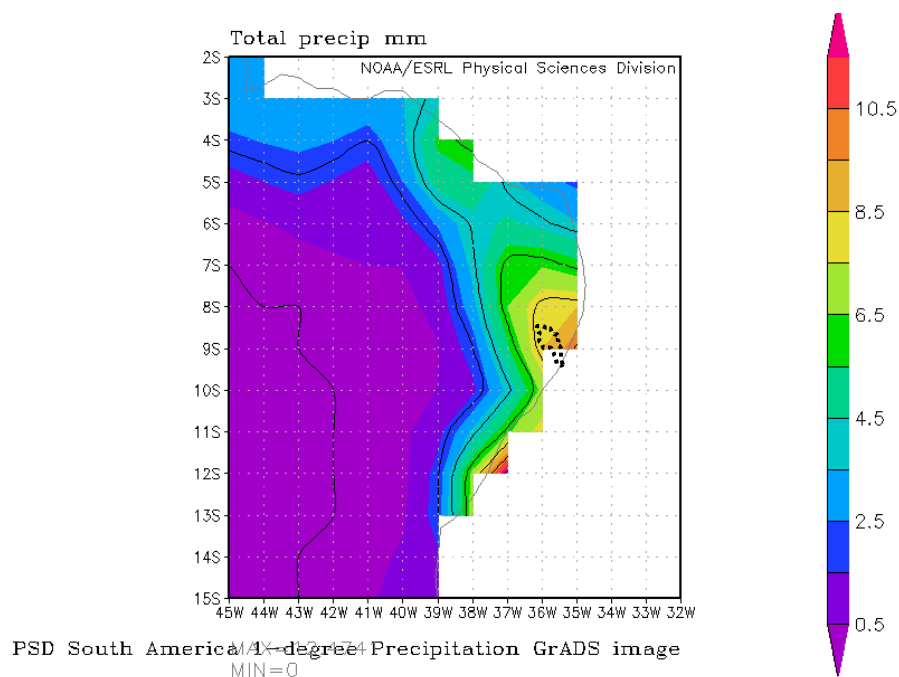


Figura 3.48 – Precipitação (mm) em 11/06/1989 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

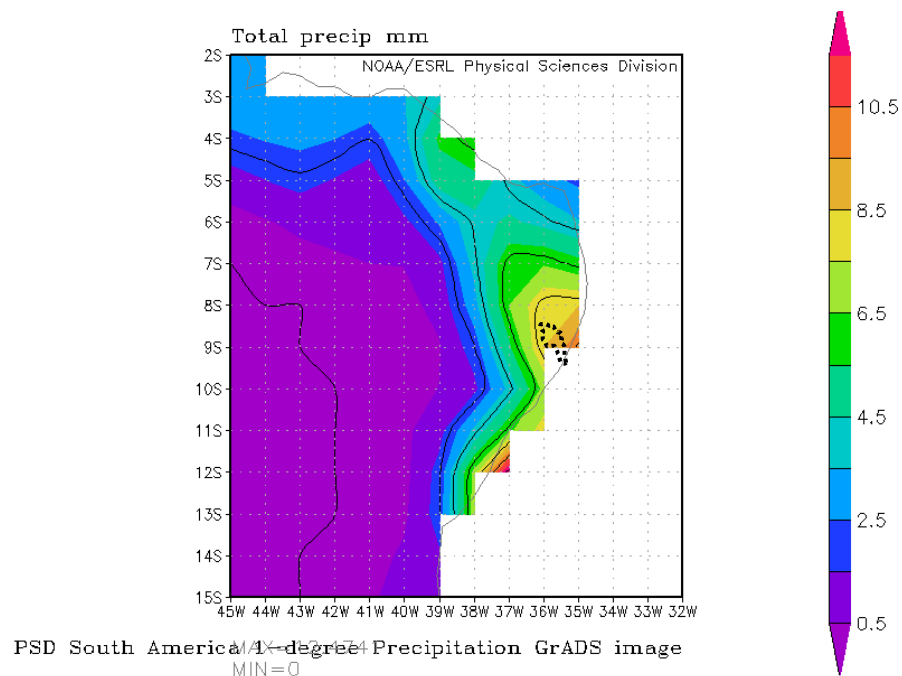


Figura 3.49 – Precipitação (mm) em 12/06/1989 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

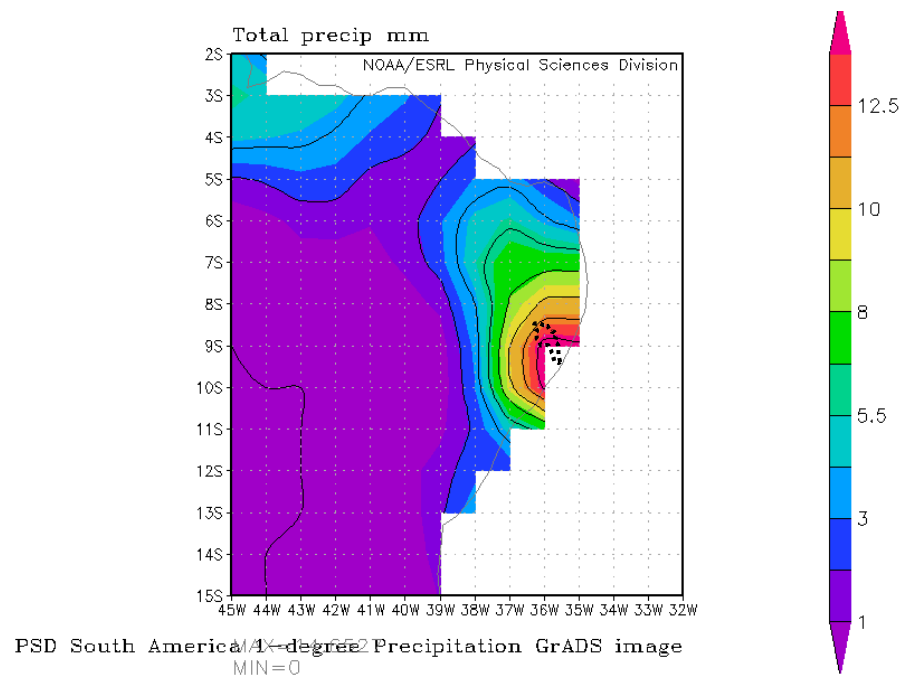


Figura 3.50 – Precipitação (mm) em 13/06/1989 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

g) Evento de inundação fluvial no dia 1 de agosto de 2000

No ano 2000 outra inundação fluvial afetou duramente a região onde está situada a bacia hidrográfica do rio Mundaú. Desta vez são 36 mortes e 76 mil desabrigados, dezenas de milhares de casas e 14 pontes destruídas e a suspensão do serviço de transporte ferroviário pela destruição das linhas férreas.

De acordo com a portaria nº 151, de 8 de Agosto de 2000 foram atingidos os municípios inseridos nos limites da bacia hidrográfica: Santana do Mundaú, São José da Lage, Murici, União dos Palmares, Branquinha e Rio Largo (Quadro 3.33).

Ao observar a distribuição espacial da precipitação percebe-se que organismos atmosféricos atuaram sobre a bacia hidrográfica durante 3 dias consecutivos e provocaram a inundação fluvial no dia 2 de Agosto de 2000 (Figuras 3.51 a 3.54).

Quadro 3.33 – Número de pessoas afetadas pela inundação fluvial nos municípios do estado de Alagoas e tipo de perigo ocorrido.

Municípios	Desabrigados	Mortes	Tipo de perigo
São José da Lage	2 400	-	Deslizamento de encostas e transbordamento do rio Canhoto
Rio Largo	4 778	4	Transbordamento do rio Mundaú
Murici	6 200	1	Transbordamento do rio
União dos Palmares	11 364	2	Transbordamento dos rios Mundaú e afluente Canabrava
Branquinha	2 500	-	Pessoas desabrigadas
Rio Largo	4 778	4	Transbordamento do rio Mundaú
Murici	6 200	1	Transbordamento de rio
Branquinha	2 500	-	Pessoas desabrigadas
Total	40 720	12	-

Fonte: extraído da Comissão externa do Senado Brasileiro, 2000.

De forma geral, a precipitação atuou no setor intermédio e inferior no dia 30 de julho e, no dia 31, com mais intensidade com precipitação acima de 27 mm; no dia 1 agosto, a precipitação se intensifica com totais em torno de 40 a 75 mm nos

setores montante e intermédio e, a jusante, supera 90 mm, sendo essa quantidade de precipitação que desencadeou a inundação fluvial que continua pelo dia 2 de Agosto de 2000.

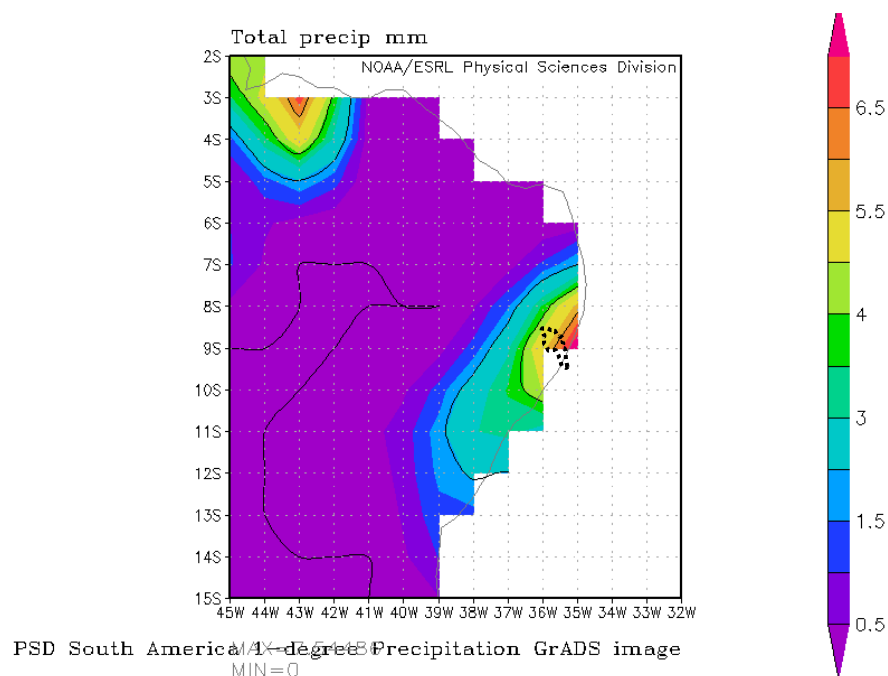


Figura 3.51 – Precipitação (mm) em 30/07/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

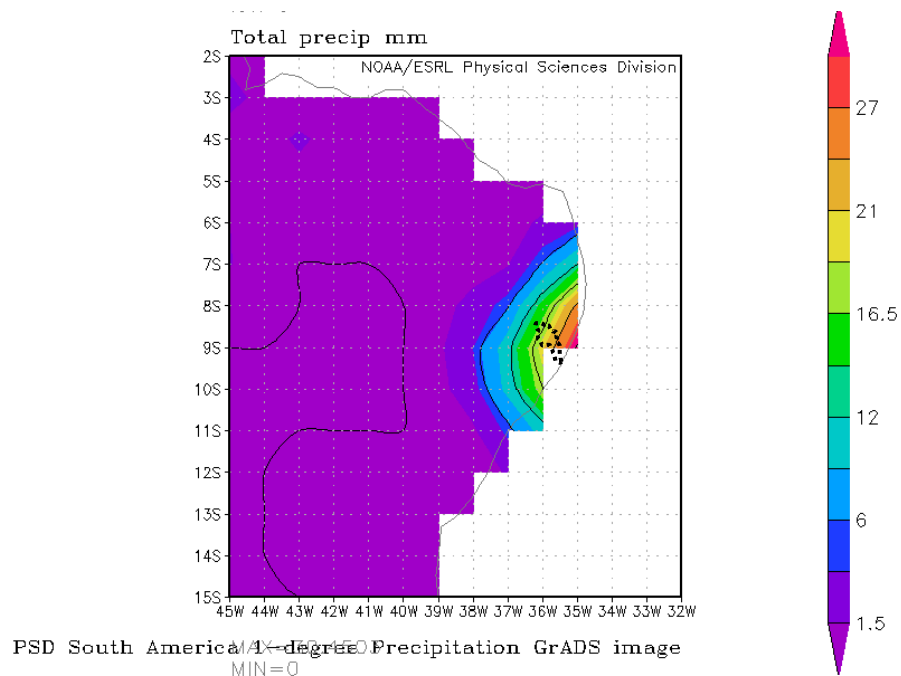


Figura 3.52 – Precipitação (mm) em 31/07/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

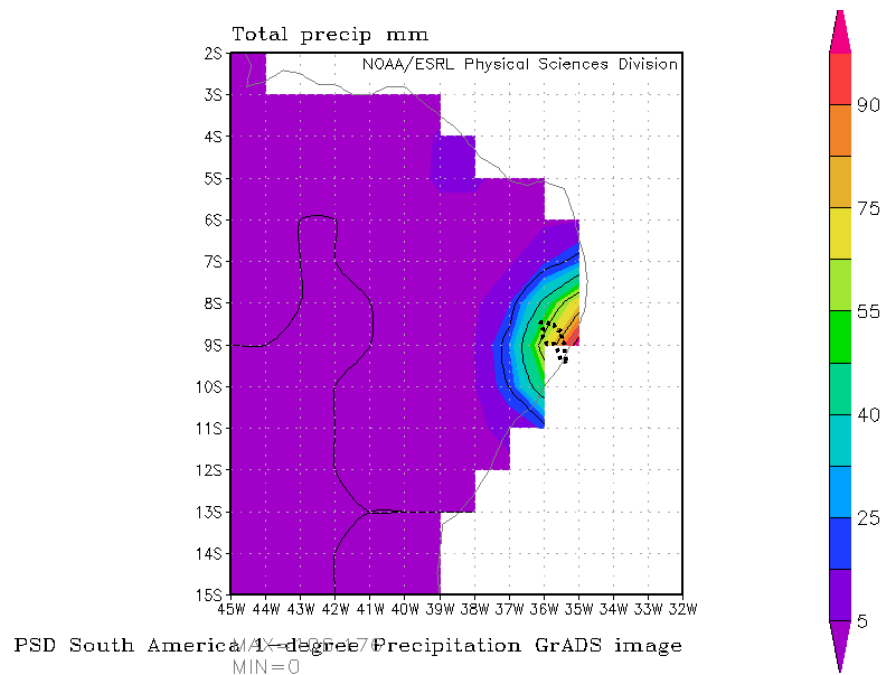


Figura 3.53 – Precipitação (mm) em 01/08/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

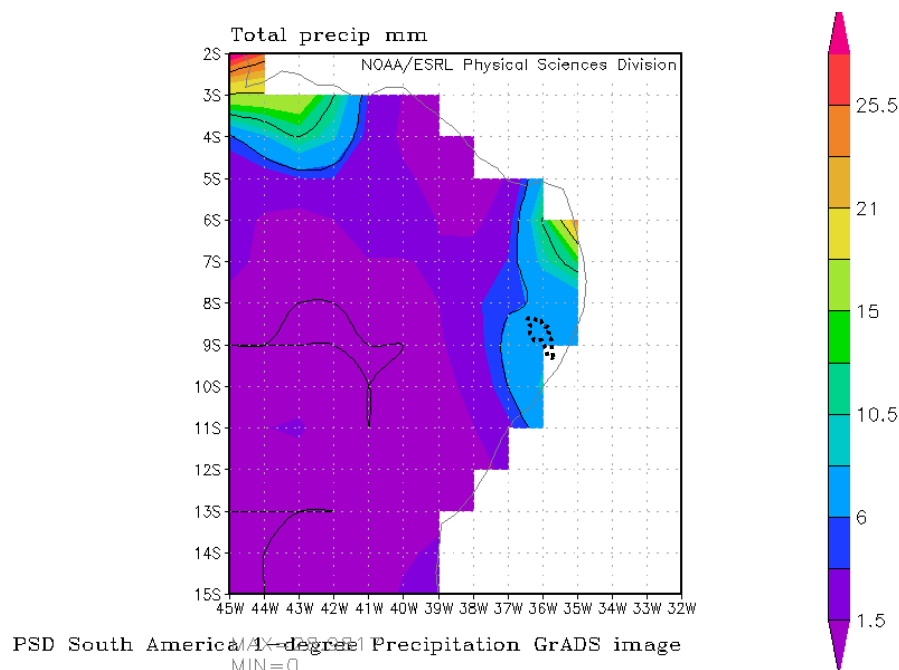


Figura 3.54 – Precipitação (mm) em 02/08/2000 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

h) Evento de inundação fluvial nos dias 18 e 19 de junho de 2010

Em junho do ano de 2010 ocorre a última grande inundação fluvial que afetou duramente as áreas urbanas (Figura 3.55 a 3.57). De acordo com os documentos de Avaliação de Danos – AVADAN e Notificação Preliminar – Nopred de Desastres, no total dos municípios atingidos, se verificaram 102 922 pessoas afetadas, das quais: 27 881 desalojados e 16 476 desabrigados; 800 levemente feridos; 520 enfermas; 12 gravemente feridas; 22 mortes e 575 desaparecidos (Quadro 3.34).

Os desalojados são as pessoas cujas habitações foram danificadas ou destruídas, mas que não, necessariamente, precisam de abrigos temporários (ficam em casa de amigos ou parentes) reduzindo a demanda por abrigos em situação de desastre. Os desabrigados são as pessoas cujas habitações foram destruídas ou

danificadas por desastres, ou estão localizadas em áreas com risco de destruição iminente, e que necessitam de abrigos temporários para serem alojadas (Furtado *et al.*, 2013).

De acordo com Instruções para o Preenchimento do Formulário de Avaliação de Danos – AVADAN, afetados representa o total de pessoas vitimadas, de alguma forma, em consequência do desastre. Uma pessoa pode sofrer mais de um tipo de dano, ou não se enquadrar em nenhum dano especificado acima. Exemplos: a) a pessoa que foi desabrigada e ferida (2 vezes atingida) é contada como 1 afetada; b) a pessoa que teve sua casa atingida por inundação e não se enquadra em nenhum dos danos humanos é contada como 1 afetada. O número de pessoas afetadas não é, obrigatoriamente, o somatório dos danos humanos.

Quadro 3.34 – Perdas e pessoas afetadas pelas as fortes precipitações ocorridas nos dias 18 e 19 de Junho de 2010 na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Municípios	UF	F	Des	Desa	Af	M	LF	DP	DL	EF	GF
Angelim	PE	AV	164	-	1 319	-	-	-	-	-	-
Correntes	PE	AV	2 330	233	13 767	-	-	-	-	-	-
Palmeirina	PE	AV	552	160	3 536	-	-	-	-	-	-
S.J.L	AL	NP	4 980	386	-	0	-	2	508	-	-
S.M	AL	NP	3 750	500	12 000	2	300	3	-	300	-
União P.	AL	AV	2000	9000	55 000	9	200	500	300	220	12
Murici	AL	NP	10 000	5000	15 000	6	-	20	-	-	-
Branquinha	AL	NP	3 200	1000	800	5	300	50			
Satuba	AL	NP	905	200	1 500	-	-	-	-	-	

S.J.L=São José da Lage; S.M=Santana do Mundaú; União P = União dos Palmares; Des=desalojadas; Desa= desabrigadas; Af= Afetados; M=Mortes; LF = Levemente feridos; DP= Desaparecidos; DL = Deslocados; EF = Enfermas; GF = Gravemente feridas.

Em relação aos danos nas infraestruturas das cidades, foram danificados 4 989 edifícios; 12 108 edifícios destruídos, incluso 3 unidades de saúde e uma afetada. Nos municípios de Angelim, Correntes, Palmeirina e União dos Palmares

totalizaram danos de 299 880 reais em 454 km de estradas e 173 300 reais em vias urbanas no total de 96 estradas e 2 unidades de saúde destruídas (Quadro 3.35)

Quadro 3.35 – Danos nas Infraestrutura atingidas pelas inundações fluviais nos municípios situados na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Municípios	UF	F	Edf.D	Edf.D	DE	D.E (km)	DV (R\$)	Vias Urb (m ²)	E.D (km)	Und .S
Angelim	PE	AV	15	-	28080	120	44000	2000	-	-
Correntes	PE	AV	304	474	189200	190	1300	20000	94	2
Palmeirina	PE	AV	152	64	79200	132	108000	2.4		
S.J.L	AL	NP	1074	391	-	-	-	-	-	
S.M	AL	NP	200	678	-	-	-	-	-	-
União P.	AL	AV	2907	1856	3400	12	20000	20	2	3
Murici	AL	NP	-	8055	-	-	-	-	-	
Branquinha	AL	NP	300	550	-	-	-	-	-	-
Satuba	AL	NP	20	40	-	-	-	-	-	

S.J.L=São José da Lage; S.M=Santana do Mundaú; União P = União dos Palmares; UF Unidade de Federação; F=fonte de dados; A = Avadan;N=Nopred;Edf.D = Edificações Danificadas; Edf.D=Edificações destruídas; DE = Danos nas Estradas em Reais; D.E(km) = Danos estradas em Km; DV = Danos nas Vias; E.D (Km) = E Destruídas; Und.S = Unidade de Saúde.

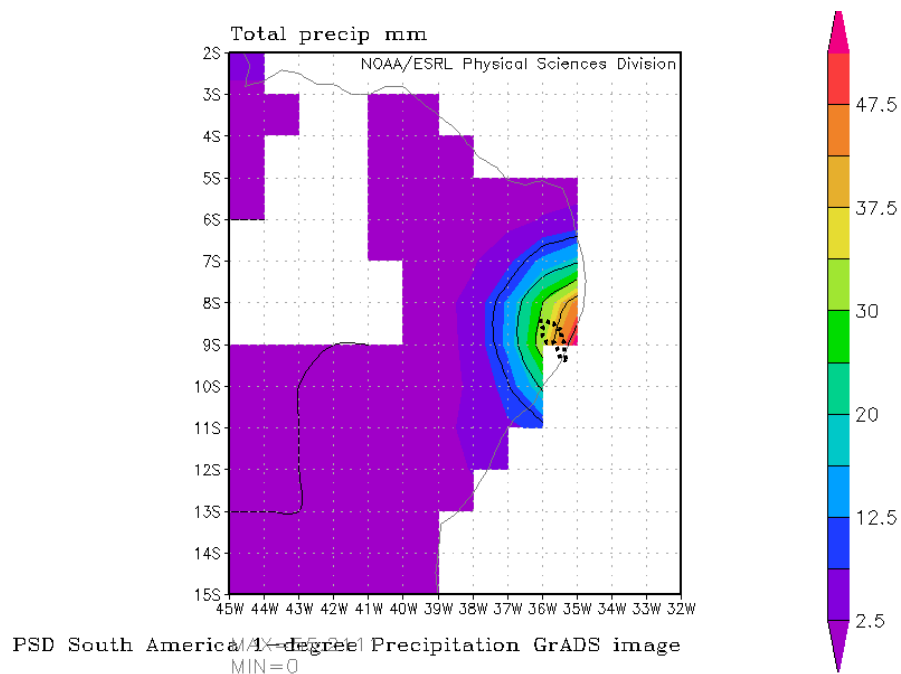


Figura 3.55 – Precipitação (mm) em 17/07/2010 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

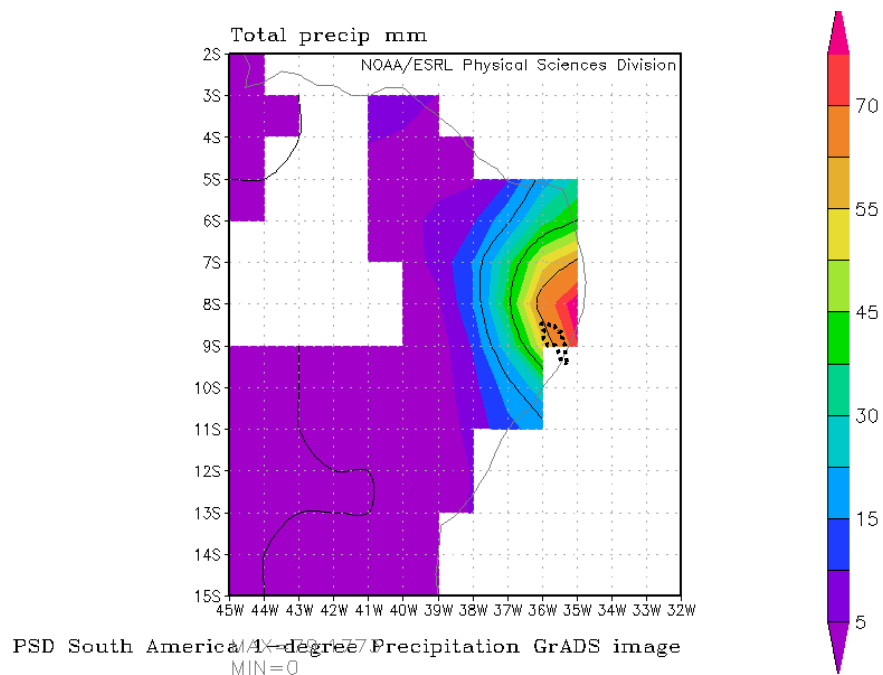


Figura 3.56 – Precipitação (mm) em 18/07/2010 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

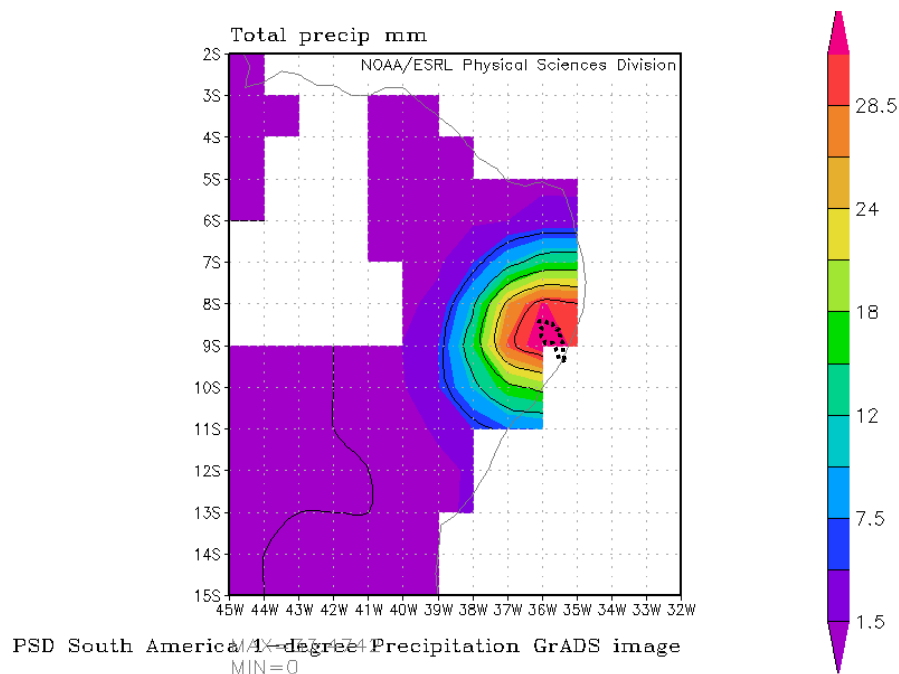


Figura 3.57 – Precipitação (mm) em 19/07/2010 no Nordeste Brasileiro, obtida por reanálise (bacia hidrográfica do rio Mundaú representada a linha pontuada). Fonte: Reanalysis Datasets, NOAA/ESRL/PSD.

3.3.4 Análise da precipitação associada à resposta das vazões nas inundações fluviais

Dianta da análise dos dados de precipitação (*Reanalysis*) mais o histórico de danos e perdas de vidas associadas as inundações fluviais que atingiram as cidades ribeirinhas na bacia do rio Mundaú se observa, que as fortes precipitações ocorridas desde o setor montante ao jusante resultaram em inundações fluvias mais severas e causaram maiores danos materiais e perdas de vidas; os setores superiores da bacia hidrográfica de maiores declives e solos rasos potencializam o volume de escoamento superficial e carga sedimentar para a metade inferior da bacia hidrográfica nos trechos dos rios que recebem carga sólida (concentrada) proveniente de montante que se espriam nas planícies aluviais dos rios Canhonto, Canhotinho, Mundauzinho e com maior intensidade ao longo do rio Mundaú.

Com efeito, são atingidas fortemente as cidades ribeirinhas situadas em leito de inundações fluviais e que mais sofreram com as inundações fluviais: São José da Lage, Santana do Mundaú, União dos Palmares, Murici, Branquinha e Rio Largo.

Diante do histórico de ocorrências de inundações fluviais na área de estudo, recorreu-se também a dados pluviométricos e fluviométricos diários com objetivo de determinar o tempo de resposta à precipitação das vazões causadoras das inundações fluviais.

Para tanto, foram selecionadas as estações pluviométricas situadas a montante das estações fluviométricas, a fim de identificar o total de precipitação responsável pelas vazões causadoras das inundações fluviais ao longo do curso do rio Mundaú (Figura 3.58). Destaca-se que as inundações fluviais de março de 1941, de 1969, de junho de 1975 e 2010 ficaram de fora dessa análise, por ausência ou insuficiência de dados de vazão nesses anos.

Assim, de acordo com a disponibilidade dos dados hidrológicos foram realizadas comparações com o objetivo de observar os impulsos de precipitação que geraram os picos das ocorrências de inundações fluviais.

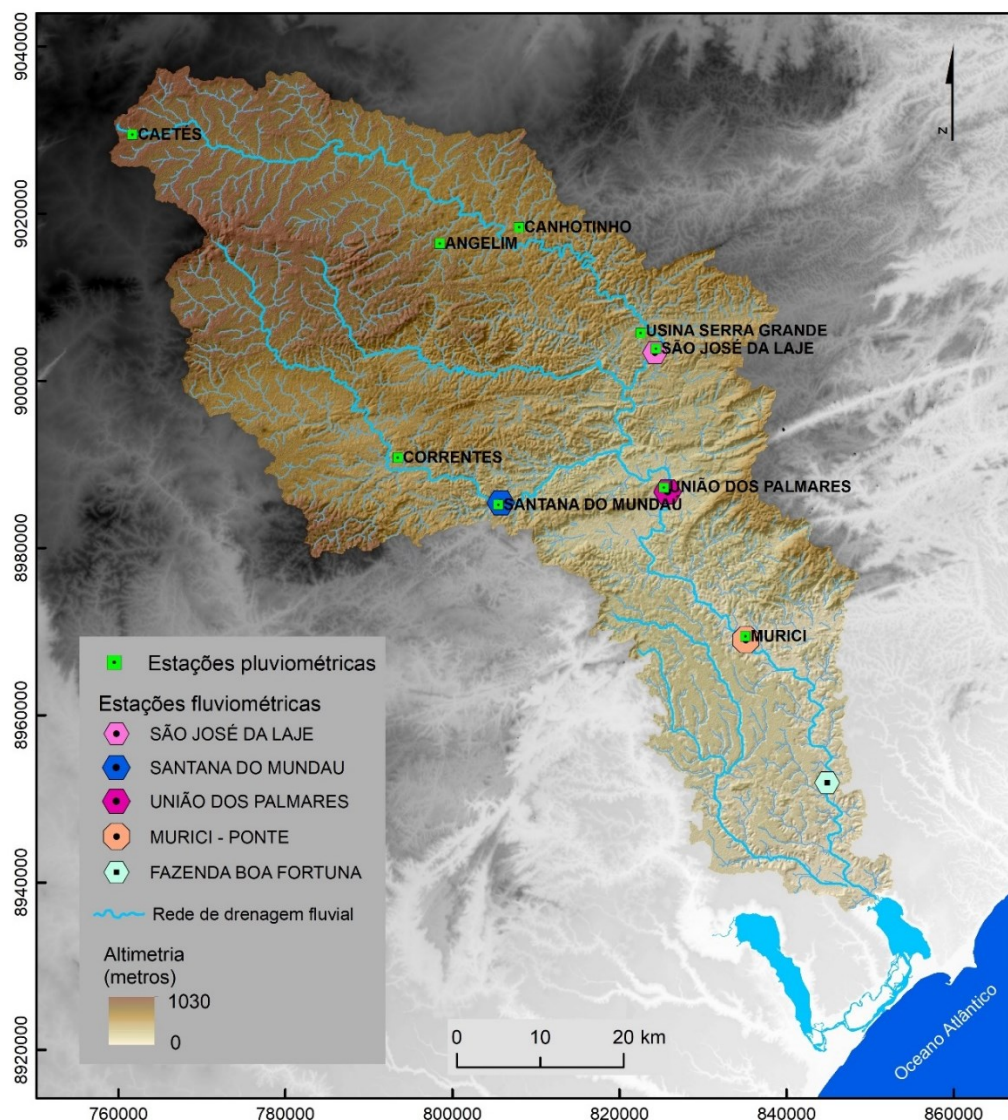


Figura 3.58 – Estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas na caracterização e comparação da precipitação com as vazões causadoras das inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Assim, de acordo com a disponibilidade dos dados hidrológicos foram realizadas comparações com o objetivo de observar os impulsos de precipitação que geraram os picos das ocorrências de inundações fluviais.

a) Evento de inundação fluvial no dia 18 de julho de 1988

Com a comparação entre os dados diários de precipitação e de vazão, observou-se a precipitação de 79 mm na estação Correntes no dia 21 de junho e que o

impulso da precipitação de 51 mm na estação de União do Palmares no dia 28 de junho causou o aumento da vazão de 110,5 para 330,6 m³/s no dia 29 de junho na estação fluviométrica de Murici – Pontes.

A precipitação na estação Correntes têm forte contribuição na inundação fluvial, pelos totais de 79,4 mm no dia 4 e 113 mm em 10 julho mais o pico máximo de 126,1 mm no dia 17 de julho.

Mais ainda, a jusante a precipitação de 52 mm na estação União dos Palmares faz gerar a vazão de 1 079,2 m³/s na estação de Murici e de 3 274,4 m³/s na estação Boa Fortuna, num trecho do rio de forte padrão de acumulação de escoamento superficial (Figura 3.59).

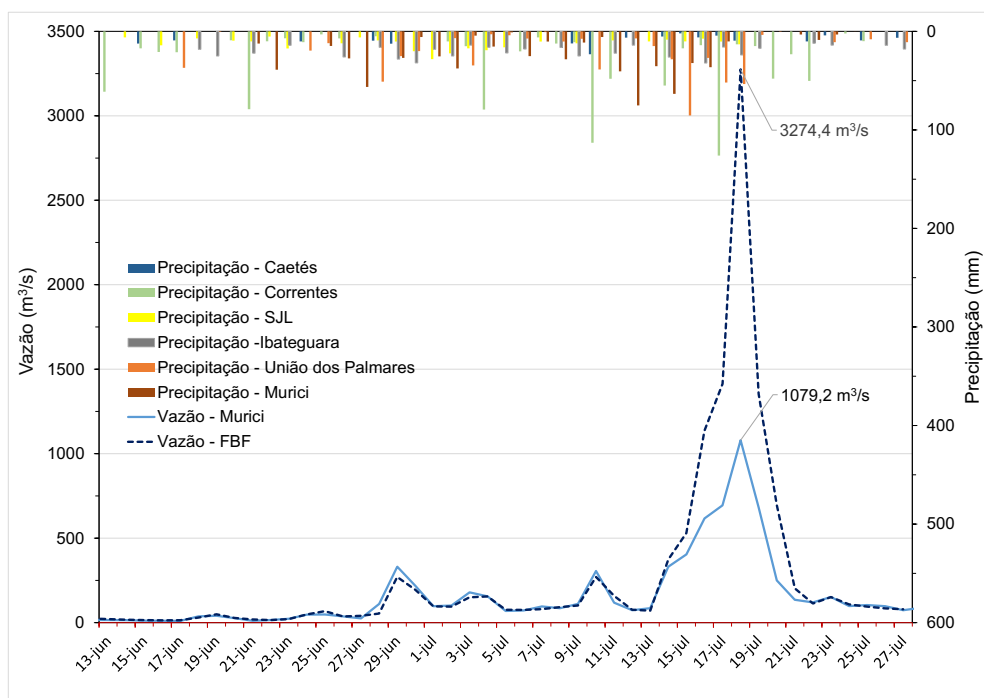


Figura 3.59 – Precipitações diárias nas estações pluviométricas e vazões diárias na estação fluviométrica de Murici, no período 11 de junho a 27 de julho de 1988.

Isto revela que a precipitação foi mais intensa no setor intermédio do que no setor jusante da bacia hidrográfica. O total diário da precipitação no dia 18 de julho na estação pluviométrica de Murici, mais próximo à estação fluviométrica da Fazenda

Boa Fortuna, foi 16 mm, o que não sustenta o total de precipitação suficiente para elevar a vazão da inundação fluvial.

E anterior ao pico da inundação fluvial, a precipitação já vinha a ocorrer na bacia hidrográfica num período de 5 dias, tempo suficiente para saturar os solos de água e contribuir para o aumento do escoamento superficial.

Evento de inundação fluvial no dia 13 de julho de 1989

No ano seguinte, no dia 13 de julho de 1989, ocorre outra inundação fluvial na bacia hidrográfica com o pico de vazão de 3 742,5 m³/s na estação fluviométrica de Fazenda Boa Fortuna. Logo, ao comparar as precipitações registradas nas estações pluviométricas situadas a montante desta estação fluviométrica, em Rio Largo, observa-se que no dia 12 de julho, dia anterior à inundação fluvial, as estações apresentaram valores diários de chuva de 20,4 mm em Caetés, 40,1 mm em Correntes, 50 mm em União do Palmares e 109,5 mm em Murici; no dia 13 de julho de 1989 a estação São José da Lage (SJL) registrou precipitação de 95 mm (Figura 3.60).

Desse modelo, constata-se que o impulso da precipitação que ocasionou a ocorrência da inundação fluvial na estação Fazenda Boa Fortuna (FBF) em 13 de julho deu-se em Murici no dia 12 de julho, mais as contribuições do total diário de precipitação em Caetés no setor montante da bacia hidrográfica, em Correntes no setor centro-oeste e em União dos Palmares no rio Mundaú (Figura 3.60).

Ainda vale destacar que as precipitações já ocorriam ao longo dos três dias antes da inundação fluvial, condições que saturam os solos e contribuem para o aumento e acumulação do escoamento superficial na rede de drenagem fluvial e após um dia de precipitação forma o pico da inundação fluvial.

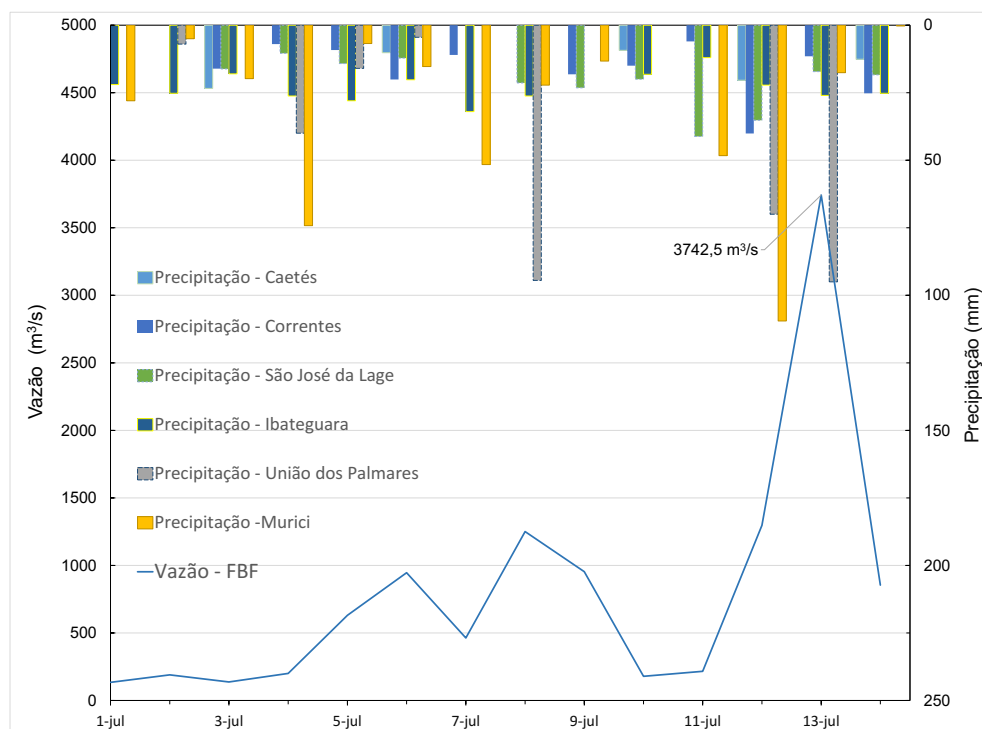


Figura 3.60 – Precipitação das estações pluviométrica de Caetés, Correntes, São José da Lage (SJL), Ibateguara, União dos Palmares e Murici comparado com os valores de vazão da estação fluviométrica de Fazenda Boa Fortuna (FBF).

Desse modelo, constata-se que o impulso da precipitação que ocasionou a ocorrência da inundação fluvial na estação Fazenda Boa Fortuna (FBF) em 13 de julho deu-se em Murici no dia 12 de julho, mais as contribuições do total diário de precipitação em Caetés no setor montante da bacia hidrográfica, em Correntes no setor centro-oeste e em União dos Palmares no rio Mundaú (Figura 3.60).

Ainda vale destacar que as precipitações já ocorriam ao longo dos três dias antes da inundação fluvial, condições que saturam os solos e contribuem para o aumento e acumulação do escoamento superficial na rede de drenagem fluvial.

b) Evento de inundação fluvial no dia 2 de agosto de 2000

Quanto à inundação fluvial ocorrida no ano 2000, registrada na estação de São João da Lage (325 m³/s), foi impulsionada pela precipitação de 135 mm e 81,4 mm respectivamente nos dias 30 e 31 de julho, registrados na estação de Usina Serra Grande; observa-se também forte contribuição da precipitação a montante

ocorrida em Angelim (65 mm) e Canhotinho (71 mm) no dia 31 de julho. Com isso, pode-se constatar que a precipitação foi mais intensa no setor intermédio da bacia hidrográfica onde ocorreu a inundação fluvial (Figura 3.61).

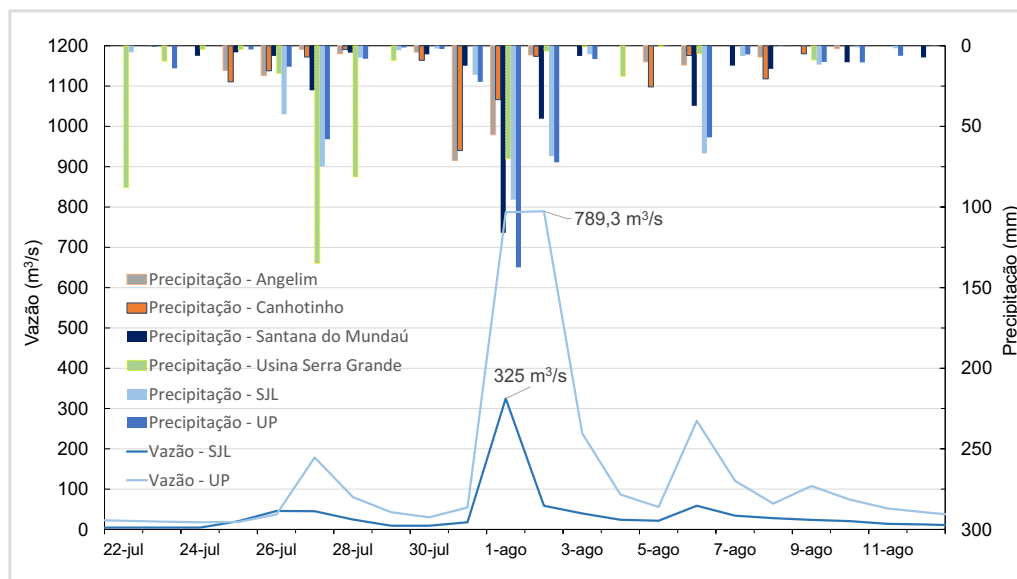


Figura 3.61 – Precipitação diária do mês de setembro de 2000 da estação de Canhotinho e valores diários de vazão da estação de São José da Lage em 22 de julho a 13 de agosto de 2000.

A vazão a jusante, em União dos Palmares, atingiu 789,3 m³/s no dia 2 de agosto de 2000 e torna-se evidente a influência das fortes precipitações registradas a montante, em Usina Serra Grande, mais as contribuições dos picos de precipitações nas estações de Santana do Mundaú e São José da Lage, determinantes na acumulação do escoamento superficial proveniente dos rios Mundaúzinho e Canhotinho, decorrente de todo o volume precipitado que desencadeou a inundação fluvial a jusante no rio Mundaú em União dos Palmares com vazão maior que duas vezes os registrados na estação SJL no rio Canhotinho.

Tal como nos casos de inundações fluviais anteriores (18 de julho de 1988 e 13 de julho de 1989) o pico de vazão acontece um dia após valores máximos de precipitação.

3.3.3.1 Conclusão

A partir da análise integrada da distribuição espacial da precipitação com os dados fluviométricos, mediante os dados hidrológicos disponíveis na área de estudo, observou-se, de forma geral, que é determinante para as inundações fluviais na bacia hidrográfica a concentração da precipitação no setor intermédio, registrada pelas estações Correntes, Santana do Mundaú (SM), Ibateguara, Usina Serra Grande (USG) e São José da Lage (SJL) (Quadro 3.38). Os setores intermédio e jusante concentram mais o volume de precipitação e, conseqüentemente, o escoamento superficial na bacia hidrográfica, sendo assim, os setores mais perigosos no que se refere as inundações fluviais (Quadro 3.36).

Quadro 3.36 – Inundações fluviais de acordo com a ocorrência espacial e influência da precipitação nos setores da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Estações pluviométricas	Anos das inundações fluviais				Setor da bacia hidrográfica
	1988	1989	1994	2000	
Caetés					Montante
Angelim					
Canhotinho					
Correntes					
SM					Intermédio
Ibateguara					
USG					
SJL					
UP					Jusante
Murici					

SM = Santana do Mundaú; USG = Usina Serra Grande; SJL = São José da Lage; UP = União dos Palmares.

	Sem dados de precipitação
	Precipitação
	Precipitação de inundação fluvial

A perigosidade dos setores resulta de diversos fatores e, embora a precipitação seja o mais importante, há que ter em conta a forma como a rede de drenagem se estrutura na bacia hidrográfica:

- a metade montante da bacia hidrográfica é a mais larga e a metade montante é a mais estreita; por isso, potencialmente, é na metade superior que há maiores condições de acumulação;
- assim sendo, o setor intermédio é, no conjunto da bacia hidrográfica, simultaneamente, o mais amplo e aquele onde a precipitação é mais elevada, pelo que é também onde a acumulação de água em um curto período é maior;
- deste modo, a confluência entre os rios Canhotinho e Mundauzinho constitui o troço mais perigoso, pois recebe, em um curto espaço de tempo, a grande acumulação das duas sub-bacias a montante;
- a partir deste troço para jusante, as vazões continuam a aumentar, mas de forma mais gradual pois a área de acumulação em ambas as margens é relativamente pequena (setor estreito até à laguna).

3.3.4 Análise do tempo de resposta da elevação do nível d'água às precipitações ao longo do rio Mundaú

Ainda com o objetivo de observar a resposta do rio Mundaú aos quantitativos pluviométricos, efetuou-se a comparação entre os dados de precipitação e os de nível d'água (cm) das estações automáticas da rede monitoramento hidrometeorológico da ANA - Agência Nacional de Águas do Brasil³. São estações hidrometeorológicas que medem, a cada hora, a precipitação e o nível de água no rio Mundaú.

³ <http://mapas-hidro.ana.gov.br>

A implantação dessa rede de monitoramento automática na bacia hidrográfica do rio Mundaú iniciou-se após o evento excepcional de inundação fluvial em 18 e 19 de junho de 2010, como parte das medidas de monitoramento, prevenção de desastres naturais e estruturação do sistema de alerta na bacia hidrográfica do rio Mundaú. São estações automáticas instaladas nos mesmos locais das estações convencionais com funcionamento a partir de 2010.

A associação desse conjunto de dados hidrológicos permite dar a noção da resposta da precipitação nos cursos d'água a partir do monitoramento instantâneo e gerar informação da propagação da inundação fluvial nos rios, o que constitui um método de apoio a um sistema de alerta de inundações fluviais no rio Mundaú.

A comparação entre a precipitação e a elevação do nível do rio Mundaú foi definida seguindo os eventos de inundações fluviais disponíveis no portal S2iD – Sistema Integrado de Informação Sobre Desastres do Ministério de Integração Nacional do Brasil. Nesse sentido, adquiriu-se os dados de precipitação e elevação do nível do rio de acordo com as datas dos registros de ocorrência das inundações fluviais no rio Mundaú.

Dessa maneira, realizou-se a comparação entre os dados das estações pluviométricas de montante (Canhotinho, São José da Lage e União dos Palmares) com os dados de nível de água do rio Mundaú nas estações situadas a jusante: União dos Palmares e Fazenda Boa Fortuna (FBF) (Figura 3.62).

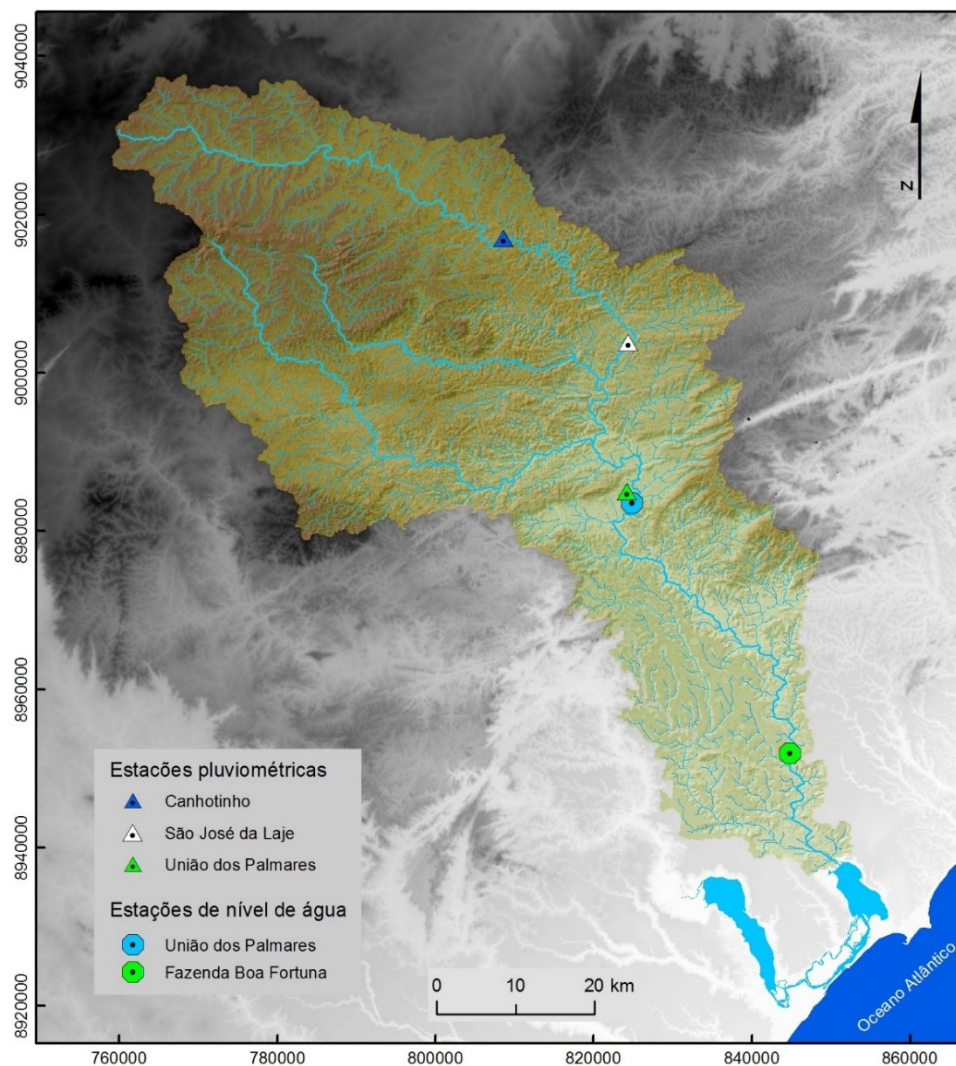


Figura 3.62 – Localização das estações pluviométricas automáticas com medições e de nível do rio utilizadas na elaboração do tempo de resposta do rio Mundaú.

A partir dos casos de extravasamento do nível de água no rio Mundaú e de acordo com a disponibilidade de dados pluviométricos e de elevação do nível do rio, realizou-se o confronto entre a precipitação e o nível do rio Mundaú em 2 casos de inundação fluvial (maio de 2011 e maio de 2013).

a) Evento de inundação fluvial no dia 5 de maio de 2011

De acordo com a Defesa Civil do estado de Alagoas, descrito no documento Notificação Preliminar de Desastres – Nopred, a inundação fluvial ocorreu no dia

5 de maio de 2011, provocada pelo aumento no volume das águas do rio Mundaú e do afluente riacho Cana Brava que atingiram a área urbana de União dos Palmares. Assim, foram confrontados os dados de precipitação da estação São José da Laje e de nível do rio da estação a jusante, Usina Laginha, ambas situadas no município de União dos Palmares.

O nível do rio já apresentava elevação gradual entorno dos 2000 mm; ao analisar os dados da precipitação registrada (13,6 mm) no dia 3 de maio de 2011, mais os totais de precipitação de 134 mm das 3h do dia 4 às 11h do dia 5 de maio, se conclui que provocaram a elevação do nível do rio nessa secção.

Decorrido a precipitação, a elevação do nível de água do rio alcança o nível de água máximo em 34 horas. Em relação aos picos de precipitação na estação Usina Laginha, em São José da Laje, de 16,8 mm fez aumentar o nível do rio em aproximadamente 1400 mm em 13 horas (Figura 3.63).

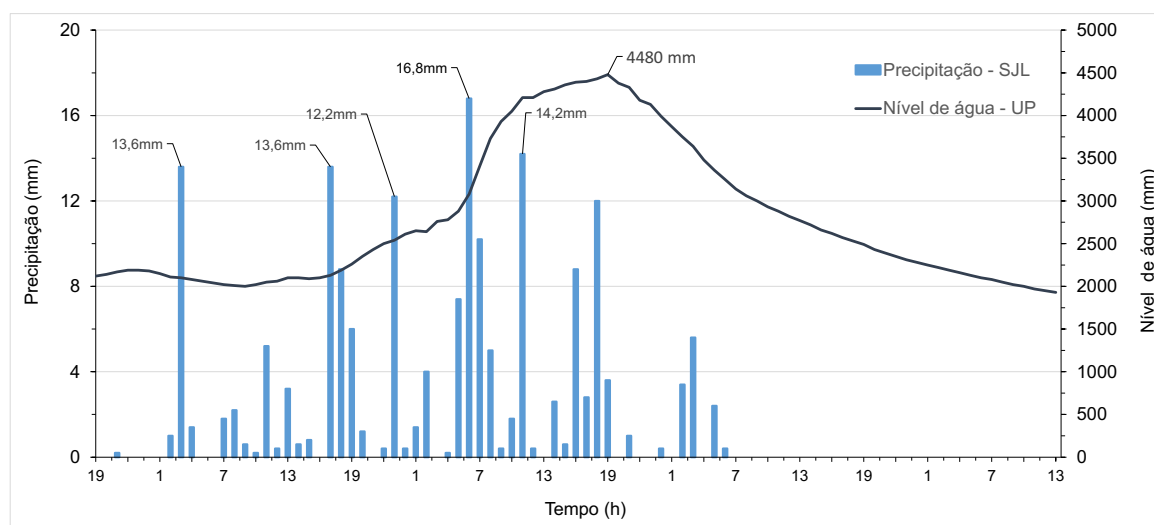


Figura 3.63 – Precipitação (mm) na estação de São José da Laje e nível do rio (cm) em União dos Palmares, no dia do evento de cheia em 04/05/2011.

Com a análise comparativa dos dados observou-se que o volume precipitado das 2h do dia 4 até às 6h do dia 5 de maio, dia da inundação fluvial, totalizou 102,4 mm (Figura 3.61).

b) Evento de inunda o fluvial no dia 3 de julho de 2013

A partir da inundação fluvial de julho de 2013, noticiada em meio eletrônico⁴, realizou-se a caracterização do tempo de resposta da elevação do nível do rio a jusante em relação à precipitação; para tanto, utilizou-se os dados de precipitação das estações Canhotinho e São José da Lage e os dados de nível do rio da estação Usina Laginha.

Tal como se observa, o nível do rio já apresentava subida devido às precipitações desde o dia 2 de julho. Assim, a precipitação a montante registrada na estação Canhotinho (7,8 mm) no dia 3 de julho pelas 16 e 17h e em São José da Lage (14,6 mm) fez o nível do rio se elevar de 2200 mm até à altura de 3624 mm em União dos Palmares (estação Usina Laginha) em 8 horas.

Mas ainda, há a considerar que o deflúvio proveniente do rio Mundauzinho é significativo na elevação do nível do rio Mundaú que, nesse caso, carece de dados horários de precipitação (Figura 3.64). Além disso, a elevação rápida do nível do rio Mundaú, nesse caso, tem influência pela contribuição do volume de água proveniente do rio Canabrava onde teve o registro da inundação fluvial .

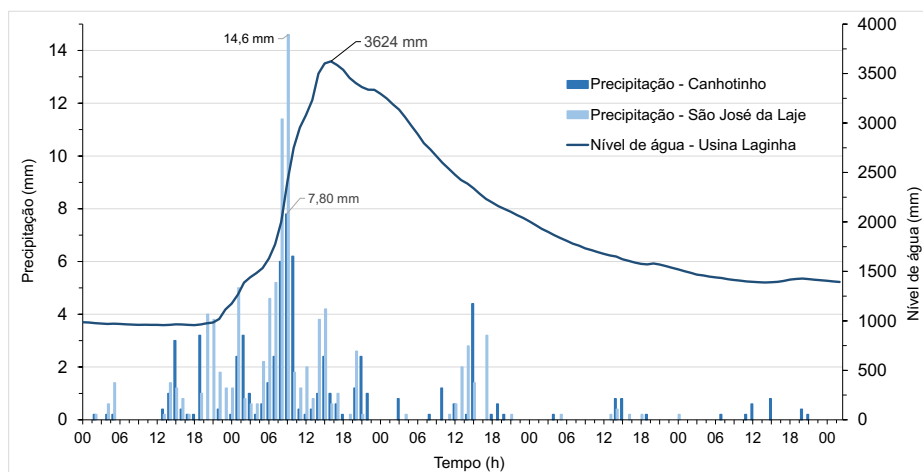


Figura 3.64 – Dados de precipitação da estação pluviométrica de Canhotinho/São José da Lage comparados com os dados de nível do rio da estação da Usina Laginha em União dos Palmares.

⁴ <http://democratizandoosaber.blogspot.pt/2013/07/fortes-chuvas-geram-transtornos-em.html>

A precipitação a montante, associada aos leitos dos cursos fluviais rochosos, solos rasos e maiores declives, a forma da bacia hidrográfica mais larga e de maior densidade de drenagem fluvial na metade superior da bacia hidrográfica, se reflete na rápida elevação do nível de água a jusante, no rio Mundaú, registrado na estação Laginha (Figura 3.64).

Em seguida, nesse contexto, compararam-se os registros de precipitação nas estações pluviométricas de Canhotinho, São José da Lage (SJL) e União dos Palmares (UP) com os dados de nível de água do rio Mundaú na estação Fazenda Boa Fortuna (FBF), situada no município de Rio Largo (Figura 3.65).

O tempo de resposta aos picos de precipitação horária de 14,6 mm (estação São José da Lage) e 15 mm (União dos Palmares), que elevou o nível do rio à cota máxima de 7677 mm às 7h do dia 4 de julho acima da cota de alerta (5450 mm segundo Reis *et al.*, 2000), se dá em 22 horas (Figura 3.65).

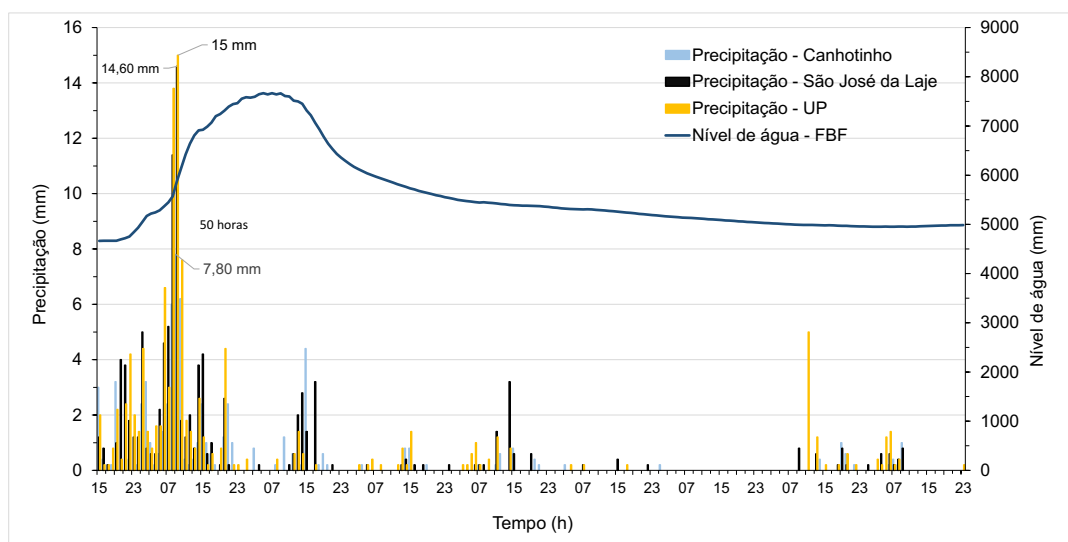


Figura 3.65 – Dados de precipitação da estação pluviométrica de Canhotinho/São José da Lage/Usina Laginha em União dos Palmares comparado com nível d'água da estação Fazenda Boa Fortuna (FBF).

As três estações pluviométricas Canhotinho, São José da Lage e União dos Palmares estão situadas em locais distantes ao longo do rio, em distâncias muito diferentes em relação à estação fluviométrica de Fazenda Boa Fortuna (FBF); por

isso, certamente, a precipitação ocorrida nas áreas daquelas 3 estações vai chegar desfasadamente (em tempos diferentes) ao troço do rio onde se encontra FBF; além disso, há ainda o escoamento superficial que vem do setor oeste da bacia hidrográfica, que não está aqui contabilizado; associado à forma alongada da bacia na metade inferior, com baixos declives em terrenos sedimentares, faz com que a curva do nível de água, no período mais elevado, apresente forma arredondada e não um pico bem evidente (Figura 3.64 e Figura 3.65).

A resposta da precipitação a montante, que escoam dos rios Mundauzinho e Canhoto para o setor de confluência no rio Mundaú, em união dos Palmares, faz elevar o nível de água mais rapidamente do que na estação mais distante Fazenda Boa Fortuna onde a elevação do rio é gradual.

3.3.5 Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Mundaú

Nesse ponto são descritas as características físicas da bacia hidrográfica através de índices morfométricos que indicam as condições de escoamento e o potencial de propagação do escoamento superficial.

A morfometria de bacias hidrográficas engloba um conjunto de índices e indicadores, que caracterizam fatores o escoamento na bacia hidrográfica: o tempo de concentração (área, forma, relevo e características da rede de drenagem das bacias hidrográficas); fatores que condicionam fundamentalmente as perdas de precipitação (condições antecedentes de armazenamento de água na bacia, coberto vegetal e uso do solo); fatores que condicionam diretamente o hidrograma da inundação fluvial (distribuição temporal e espacial da precipitação) (Ramos, 2009).

Dessa forma, através dos cálculos de indicadores geométricos e a partir da altitude, representada por modelos digitais de elevação em SIG realiza-se a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas (Eze & Joel. 2010; Gama *et al.*, 2011; Dubey & Tiwari, 2011; Raj & Azeez, 2012).

3.4.5.1 Morfometria da bacia da bacia hidrográfica

A análise da bacia hidrográfica, através da morfometria teve como base a utilização do modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, com 30 metros de resolução espacial (Farr *et al.*, 2007), manipulado em SIG, trabalhado no sistema métrico de coordenadas UTM, fuso 24S e elipsóide de revolução WGS 84.

Para tanto, inicialmente se realizou o preenchimento e correções das células sem valor (*no data*) a partir da função *fill* e, posteriormente, foram gerados os mapas de direção de fluxos e fluxo acumulados, rede de drenagem fluvial e processamento para delimitação automática da área da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Com a delimitação da bacia hidrográfica foram calculados a área, o perímetro, a extensão do maior rio, o comprimento axial e amplitude, máxima, mínima e média de elevação da bacia hidrográfica, etc. Segundo Tonello (2006), as características morfométricas podem ser divididas em: características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem; há forte correspondência entre as características físicas e a resposta hidrológica numa bacia hidrográfica (Villela & Mattos, 1975). Para tanto, a modelagem morfométrica da bacia hidrográfica do rio Mundaú foi realizada a partir das equações encontradas em Christofoletti (1969), Villela e Mattos (1975), Tonello (2006), Antoneli e Thomaz (2007), Ramos (2009) e são apresentadas a seguir:

a) índices de forma que relacionam a forma da bacia e um retângulo, correspondendo à razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia hidrográfica. Assim, calculou-se o índice de forma de Horton (K_f), $K_f = A/Cb^2$, em que A é a área da bacia hidrográfica (km^2) e Cb é o comprimento da bacia (em km);

- b) Índice de circularidade (I_c), relação da área da bacia hidrográfica e a área do círculo de mesmo perímetro (Miller, 1953), $I_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}$, onde A = área da bacia (km^2) e P = o perímetro da bacia (k);
- c) Índice de alongamento (Schumm): $I_a = \frac{2\sqrt{(A/\pi)}}{Cb}$, em que A = Área da bacia (km^2) e Cb = comprimento da bacia (km);
- d) Índice de Homogeneidade (I_h) relaciona a bacia com a forma oval e tanto mais próximo de zero, quanto mais alongada for à bacia, onde $I_h = \frac{A}{3,85} \left(\frac{Cb}{2,59} \right)^2$;
- e) Eficiência da drenagem da bacia: densidade de drenagem (D_d) representado pela relação entre o comprimento total (L_t) das drenagens fluviais e a área da bacia hidrográfica (A): $D_d = \frac{L_t}{A}$; Densidade hidrográfica (D_h): relação entre o número de cursos d'água e a área da bacia hidrográfica, ou seja, quantos rios existem por km^2 em uma dada bacia hidrográfica, e é expressa pela fórmula: $D_h = \frac{N}{A}$ (N = número de cursos d'água e A = área de drenagem). A finalidade deste índice é comparar a frequência de cursos d'água em uma área de tamanho padrão, como por exemplo, o quilômetro quadrado (Christofolletti, 1969);
- f) Coeficiente de Manutenção (Schum) fornece o valor da área mínima necessária ao desenvolvimento ou manutenção de um metro de canal de escoamento. Na avaliação de suscetibilidade às cheias numa bacia hidrográfica; quanto menor for seu valor mais rápido a precipitação vai se concentrar nos canais de drenagem fluviais;
- g) Ordem dos cursos d'água, foi obtida de acordo com a metodologia proposta por Strahler (1957), onde os canais sem tributários são considerados de primeira ordem; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem; os de terceira ordem podem receber um ou mais tributários de segunda ordem, mas também receber de primeira ordem; os de quarta ordem recebem tributários de terceira ordem e também de ordem inferior e assim sucessivamente;

h) Magnitude de drenagem (Shreve), nesse método a magnitude será maior quanto mais canais em funcionamento houver na bacia hidrográfica. A magnitude, na prática, correspondem aos números de canais de ordem 1 que estão situados na cabeceira da bacia hidrográfica de acordo com o critério de Strahler. A magnitude dos canais fluviais aumentam a medida que são somadas as ordens dos canais a montante da confluência dos canais de drenagens fluviais;

No que se refere a caracterização quanto a concentração do escoamento superficial, calculou-se o Tempo de concentração (T_c) por diferentes métodos apresentados de forma resumida no quadro 3.37.

Quadro 3.37 – Método de cálculo do tempo de concentração (T_c) na área de estudo.

Método	Equação	Parâmetros da equação
Kirpch	$T_c = 0,39 * \left(\frac{L^2}{S}\right) * 0,385$	T_c (h); L = comprimento do curso principal (km); S = inclinação média da drenagem (%).
US Corps Engineers	$T_c = 0,191 * \left(\frac{L^{0,16}}{I^{0,19}}\right)$	T_c (min) L = comprimento do curso principal (km); I = declividade longitudinal (m/m).
DNOS	$T_c = \frac{10}{K} * \left(\frac{A^{0,3} * L^{0,2}}{I^{0,4}}\right)$	T_c (h); A =área da bacia hidrográfica (ha); L = comprimento do talvegue (m); I = declive (%); K = característica da bacia.
Fórmula prática (California Highway Department)	$T_c = \left(\frac{0,87 * L^3}{H}\right)^{0,385}$	T_c (min); L =comprimento do talvegue (km); i = declive (m);

3.3.5.1 Resultados da modelagem morfométrica da bacia hidrográfica

Com a delimitação automática da bacia hidrográfica e definição dos parâmetros, índices, fatores de formas e geometria da rede drenagem, foram realizados os cálculos e assim a modelagem morfométrica da bacia hidrográfica do rio Mundaú

(Quadro 3.38 e 3.39). Também foram realizados os cálculos morfométricos da bacia hidrográfica, abordagem linear, areal e hipsométrica da rede de drenagem fluvial e seus respectivos indicadores. Pelos fatores e índices de forma se constata que a bacia hidrográfica tem forma alongada (Quadro 3.38).

Quadro 3.38 – Resultados dos indicadores geométricos da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Parâmetros geométricos	Índice
Fator de forma (Horton) Straight-Length	0,24
Índice de circularidade (Miller)	0,2
Índice de alongamento (Schumm)	0,55
Índice de Homogeneidade (Ih) (Pinchemel)	0,41

Os índices que caracterizam a eficiência de drenagem fluvial da bacia hidrográfica, o coeficiente de manutenção de Schumm (1985) assim como a densidade de drenagem, que determinam a eficiência das drenagens naturais, se mostraram baixos no contexto das drenagens fluviais da bacia hidrográfica. No entanto, estes resultados são dependentes da hidrografia utilizada, que é de escala relativamente pequena e não inclui a maior parte dos cursos de água. Assim, os valores destes índices estão afetados pela mesma situação.

Quadro 3.39 – Resultados dos indicadores geométricos da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Morfometria	Fator
Coeficiente de Manutenção m^2/m (Schumm)	1346,5
Densidade de drenagem (km/km^2)	0,74
Densidade de hídrica de Horton (n° de cursos d'água/ km^2)	0,71

E quanto à hierarquia da rede drenagem fluvial pelo método de Strahler (Figura 3.66), a ordenação da rede drenagem fluvial da bacia hidrográfica à medida que cresce (ordens 1 a 6) há diminuição dos comprimentos de drenagens fluviais totais (Figura 3.67).

Devido a forma mais larga da bacia hidrográfica em sua metade superior, há maior desenvolvimento das drenagens fluviais nesse setor. As drenagens fluviais afluentes de ordem 1, 2 e 3 compõem um conjunto trechos de drenagens fluviais menores mas, nesse mesmo setor, há rios desenvolvidos de ordem 4 e no setor intermédio desenvolvem rios de ordem 5.

O que se observa e é mais importante é que a hierarquia mais elevada (6) é atingida logo a meio da bacia hidrográfica, na confluência entre os rios Canhotinho e Mundauzinho, onde a bacia é mais larga; a partir daqui até a desembocadura, a bacia hidrográfica, mais estreita, não permite o desenvolvimento da rede de drenagem em ambas as margens e, por isso, o rio Mundaú mantém a ordem 6 até à confluência com o oceano.

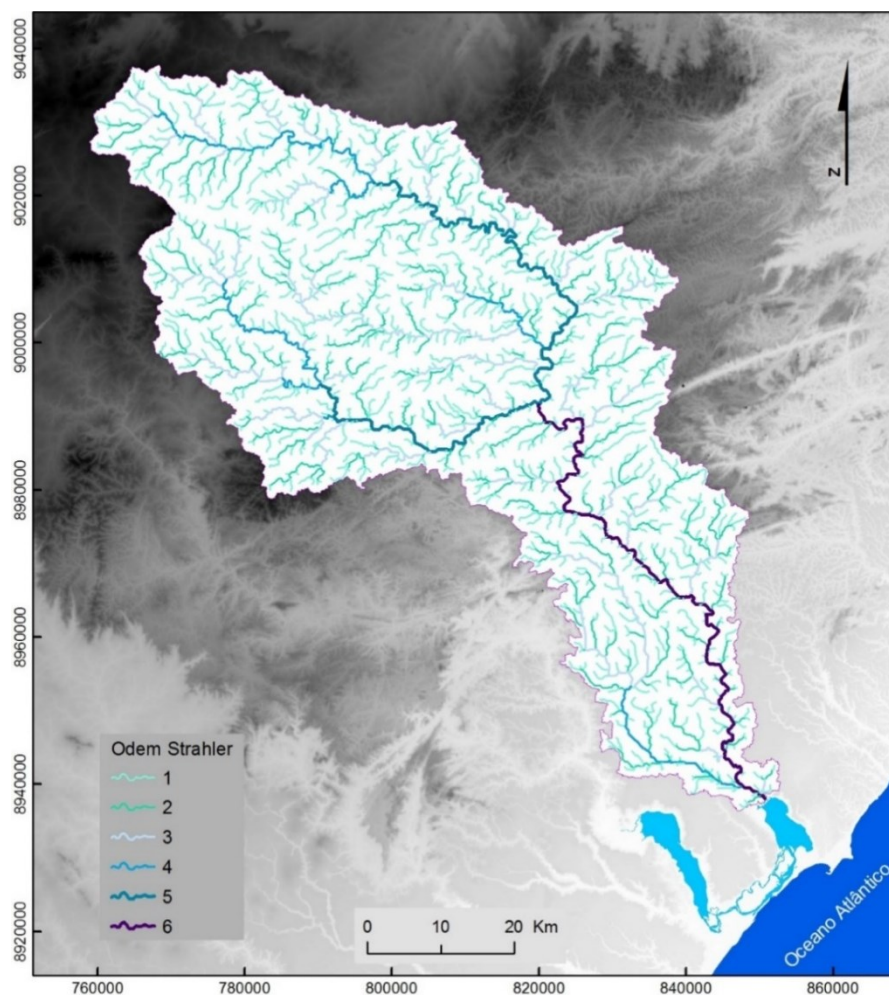


Figura 3.66 – Hierarquia de rede de drenagem, segundo o método de Strahler, na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

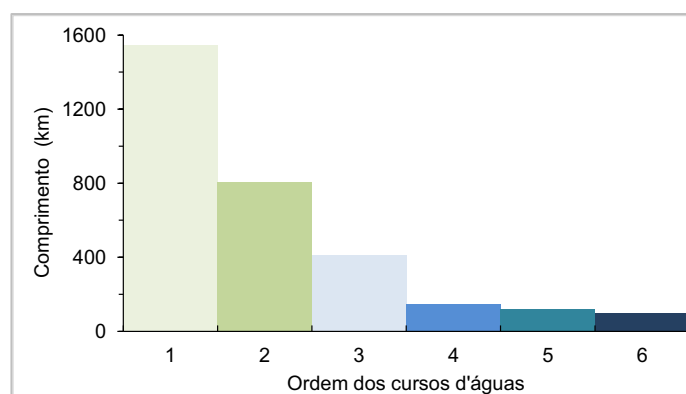


Figura 3.67 – Comprimento total (km) dos canais fluviais para cada valor de hierarquia (1, 2, 3, 4, 5 e 6) segundo a classificação de Strahler.

Em relação ao método de Shreve (Figura 3.68), a rede de drenagem fluvial apresenta magnitudes elevadas no rio Mundaú, com valores mais significativos no setor alagoano, onde foi obtida magnitude de 1171. No entanto, tendo em conta a dimensão da bacia hidrográfica, este valor é muito baixo, o que se explica pela informação hidrográfica de pequena escala utilizada neste cálculo. As magnitudes de drenagens fluviais se elevavam a meio da bacia hidrográfica e, conseqüentemente, a jusante no rio Mundaú, as máximas magnitudes de Shreve corresponde ao trecho de 95,5 km de comprimento do rio Mundaú até a desembocadura.

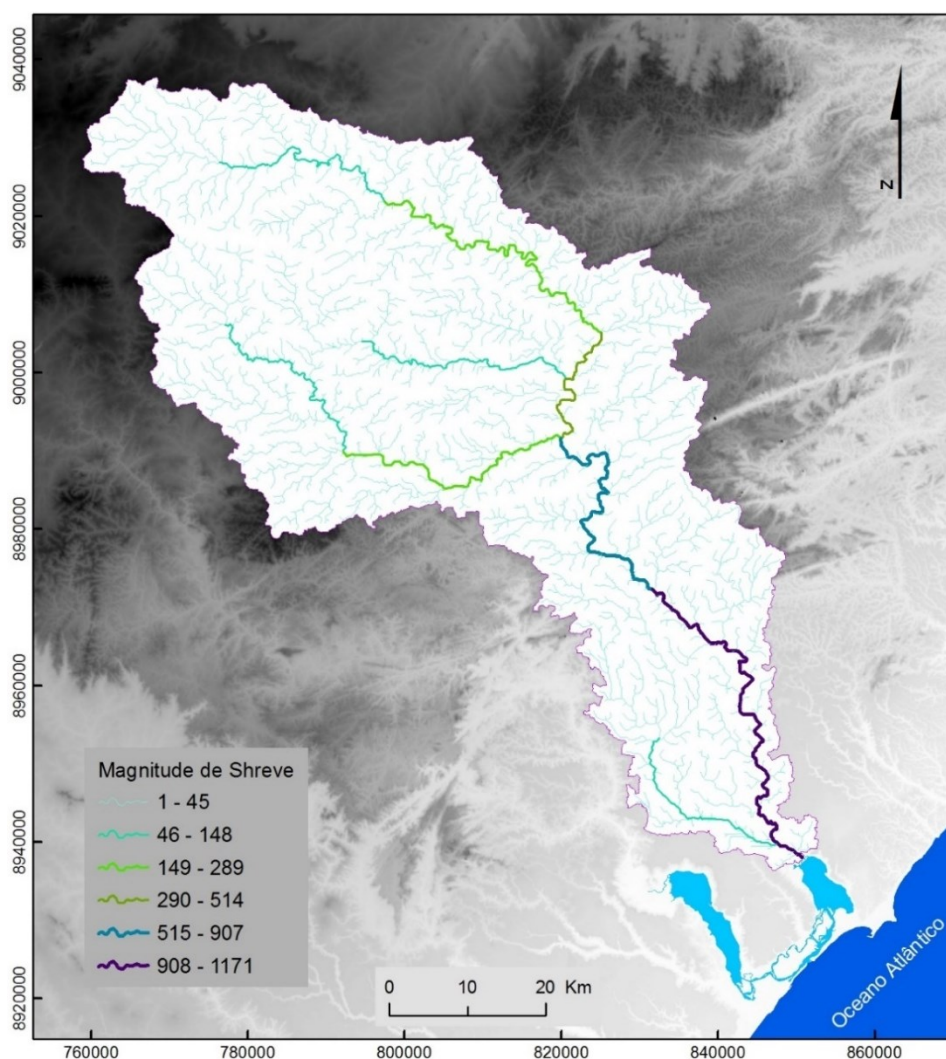


Figura 3.68 – Magnitude da rede drenagem, segundo o método de Shreve, na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Na sequência da caracterização dos canais fluviais, é apresentada a declividade média dos canais fluviais em percentagem (Figura 3.69) e constata-se o predomínio das seguintes classes de declividades nos setores da bacia hidrográfica:

- i) as drenagens fluviais com declives maiores que 15 % e de 5 a 15 % correspondem a 8,2 % do total de drenagens fluviais na bacia hidrográfica; estão situadas nas cabeceiras de vertente estrutural e, no interflúvio leste, maiores declives em áreas de falhas no setor intermédio da bacia hidrográfica. São drenagens fluviais intermitentes de acentuados declives que potencializam o escoamento superficial em leito fluvial rochoso (Figura 3.69 e 3.70);
- j) o intervalo de classe de 2 a 5 % corresponde a 40,2 % da drenagem fluvial na bacia hidrográfica; está situada nas cabeceiras de drenagens fluviais no setor montante em vertente estrutural e a jusante em terrenos sedimentares e são mais desenvolvidas do que as classes de drenagens anteriores (maior que 15 e de 5 a 15 %) em profundidade e em largura, pelo que são dissecados devidos a erosão dos fundos dos vales que associados a elevados declives impulsionam o escoamento superficial e o transporte de sedimentos para jusante nos rios de ordens 4 a 6;
- k) a classe de declives de 2 a 1 % corresponde as áreas planas, são drenagens fluviais mais profundas e largas, de ordem 4 e 5 (rios Mundauzinho e Canhoto) predominantes na metade superior da bacia hidrográfica. Essas drenagens abrangem 31,6 % do total da rede de drenagem fluvial onde predominam os processos de transporte e deposição de sedimentos, e se interligam as drenagens fluviais de menores declives (0,5 a 1%) a jusante na metade inferior da bacia hidrográfica;
- l) as drenagens fluviais de declive 1 a 0 % compreendem 18,8 % do total da rede de drenagem e possuem maiores extensões e desenvolvimento das drenagens fluviais, são predominantes na metade inferior da bacia hidrográfica em terrenos sedimentares aluvionares, em planícies fluviais de fraco declive e

fortes processos hidrodinâmicos de mudanças das formas da rede de drenagem, devido ao processo de erosão hídrica das margens fluviais, transporte, elevada acumulação de sedimentos e escoamento superficial ao longo do rio Mundaú;

m) os canais de drenagens fluviais com declive de 0 – 0,5 % estão “pontualmente” situados em cabeceiras e em setores de confluências dos rios sem grandes expressividade espacial na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

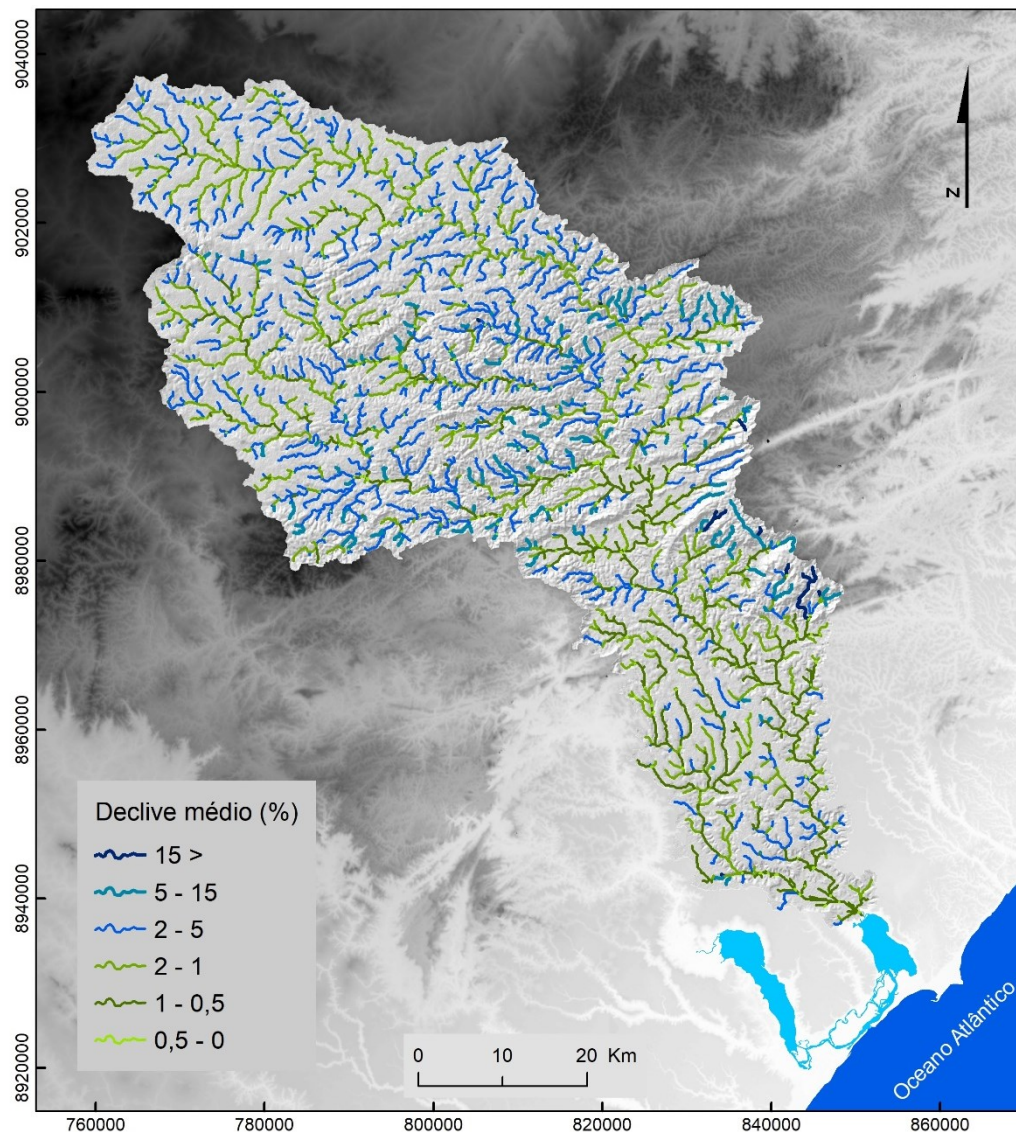


Figura 3.69 – Declividade média (%) dos canais de drenagem fluvial na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

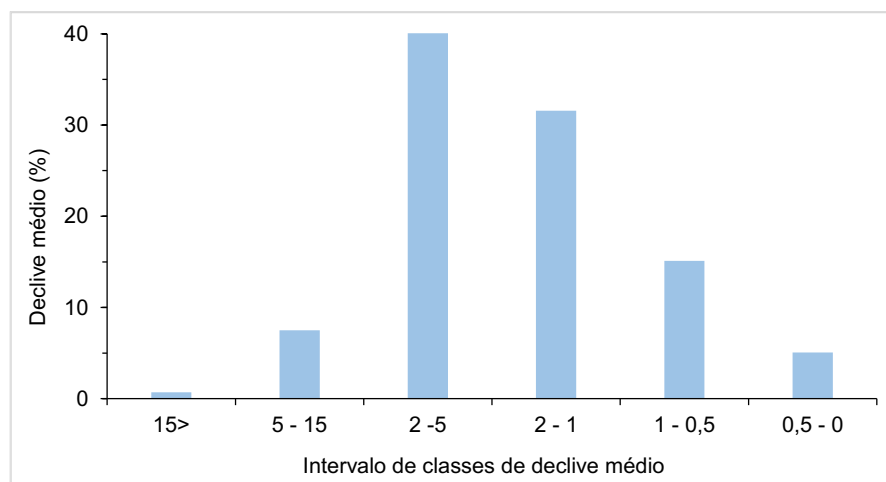


Figura 3.70 – Frequência (%) das classes de declividade média dos canais fluviais da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Quanto ao tempo de concentração, os métodos de Kirpch, *US Corps Engineers* e *California Hightway Department* apresentaram valores muito próximos, entre 36 e 38,4 horas (Quadro 3.42). Quanto ao método do DNOS ($k = 3$, referente ao terreno comum, coberto de vegetação de absorção moderada) apresentou menor tempo de concentração, de apenas 25,7 horas. Assim, no que se refere ao tempo de concentração médio da bacia hidrográfica é 32,8 horas (Quadro 3.40).

Quadro 3.40 – Tempo de concentração da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Métodos de cálculo de tempo de concentração	Horas
Tc (Kirpch)	38,38
US Corps Engineers	36,96
DNOS (Tc)	25,72
Fórmula prática (<i>California Hightway Department</i>)	36,17
Média	32,8

3.3.5.2 Discussão dos resultados

A bacia hidrográfica do rio Mundaú, pela sua morfometria e padrões de drenagens fluviais, apresenta predisposição a geração e propagação do escoamento

superficial, transporte sedimentar principalmente de maior concentração a meio da bacia hidrográfica.

A forma da bacia hidrográfica na metade superior é mais larga, possui maior densidade de drenagem, maiores declives das drenagens fluviais em vales encaixados, leito fluvial rochoso com hierarquia de drenagem de ordens 4 e 5 que potencializam o escoamento superficial e o transporte sedimentar para jusante, principalmente, num setor de bifurcação dos rios Canhoto e Mundaúzinho.

Consequentemente, a jusante no setor mais estreito da bacia hidrográfica (alongada) o rio Mundaú torna-se de elevado perigo a inundação fluvial. É nesse setor mais estreito que o ordenamento de drenagem fluvial é maior (6) tal como a magnitude de Shreve é maior, e apresentam baixos declives em planícies aluviais e canais de drenagens mais largos e desenvolvidos; aonde a variação sazonal do nível de água do rio Mundaú em terrenos sedimentares faz desenvolver os canais fluviais em planícies aluviais desenvolvidas com maiores áreas alagáveis.

Para além dos fatores e índices de forma da bacia hidrográfica, o tempo de concentração médio da bacia hidrográfica mostra que as condições de concentração do escoamento superficial desde a cabeceira até foz é de em pouco mais de um dia 1 dia e 8,8 horas, é um indicativo de tempo de concentração relativamente curto pela dimensão da bacia hidrográfica e indica ser uma bacia hidrográfica com forte predisposição a inundações fluviais.

3.3.6 Avaliação da suscetibilidade as inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio Mundaú

Além da avaliação da bacia hidrográfica associada à sua morfometria, essencialmente nas suas condições naturais do terreno, são também consideradas as alterações antrópicas na avaliação de suscetibilidade às

inundações fluviais representativas dos processos hidrológicos modelados por meio do uso de ferramentas em SIG.

Permite associar às condições naturais as interferências humanas, as alterações ambientais, por exemplo, a retirada da cobertura vegetal, impermeabilização do solo, associado à deposição de sedimentos nos leitos dos rios que contribuem na diminuição na capacidade de drenagem de água nos canais fluviais e favorece a intensificação do escoamento superficial, contribuindo assim para o perigo de inundações fluviais.

Nesse sentido, a modelagem geográfica de bacias hidrográficas identifica setores perigosos de drenagens fluviais, de predisposição às inundações fluviais pelas condições do terreno a partir da suscetibilidade.

Em modelagem fluvial, a avaliação das condições propícias às inundações fluviais exige o desenvolvimento de procedimentos específicos para que os valores de cada variável num ponto da bacia hidrográfica reflitam as condições das áreas drenantes para esse ponto (Reis, 2011). Logo, este tópico tem o objetivo de avaliar a suscetibilidade dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Mundaú à ocorrência de inundações fluviais por meio de modelagem geográfica em ambiente SIG.

3.3.6.1 Elaboração do modelo de susceptibilidade a inundações fluviais

A avaliação da suscetibilidade às inundações fluviais se deu com a aplicação do modelo conceitual desenvolvido por Reis (2011), utilizado, entre outros, por Jacinto *et al.* (2015) e por Santos & Reis (2017). O modelo conceitual identifica os setores da rede hidrográfica suscetíveis à ocorrência de inundações fluviais por um processo representativo do escoamento superficial concentrado acumulativo nos cursos d'água, classificados de acordo com a intensidade da acumulação

resultante da interação das variáveis médias acumuladas (fatores de predisposição) integradas por análise multicritério (AMC).

Assim, as variáveis geográficas utilizadas na elaboração do modelo de suscetibilidade a inundações fluviais foram as seguintes:

- a) Área acumulada;
- b) Declividade;
- c) CN (*Curve Number*).

O resumo dos processos de elaboração do modelo conceitual de suscetibilidade às inundações fluviais estão de acordo com a figura 3.71.

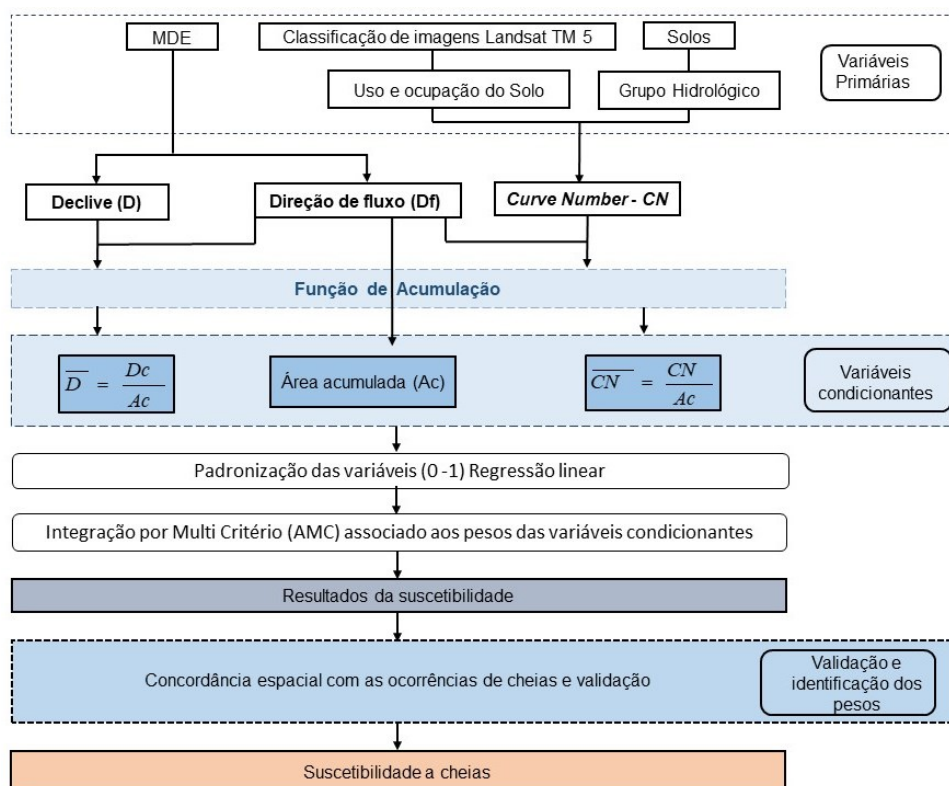


Figura 3.71 – Fluxograma das etapas de aplicação e elaboração das variáveis do modelo conceitual de suscetibilidade a cheias (adaptado de Reis, 2011).

3.3.6.2 Elaboração dos fatores do modelo de suscetibilidade às inundações fluviais

A partir das variáveis primárias (declividade, CN – *Curve Number* e área acumulada) dos fatores de predisposição da bacia hidrográfica, foram processadas as variáveis médias de acumulação para a elaboração do modelo conceitual de inundações fluviais:

a) Área acumulada (Ac)

Obtido pelo fluxo acumulado que representa a acumulação das células no sentido do escoamento, processado a partir da direção de fluxo, calculado através das 8 células vizinhas (Jenson e Domingue, 1988), a partir do Modelo Digital de Elevação (SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução de 30 metros.

b) Declive médio (Dc)

O declive foi calculado em graus e em seguida calculou-se o declive acumulado ao longo da direção de fluxos. Assim, a variável declive médio (\overline{D}) foi obtido a partir da divisão pela área de estudo acumulada, onde:

$$\overline{D} = \frac{Dc}{Ac}$$

\overline{D} : declive médio;

Dc: declive acumulado;

Ac: área acumulada (n.º de células).

c) CN (*Curve Number*) médio

A variável CN acumulada foi construída a partir do uso e ocupação do solo e do tipo de solo; inicialmente realizou-se a classificação hidrológica dos solos de acordo com Sartori *et al.* (2005) e, em seguida, o cruzamento com mapa de

ocupação do solo e, posteriormente, foi fornecido os valores de CN de acordo Cronshey (1985) e utilizado por Tucci (1998).

Optou-se por utilizar a variável CN que engloba os tipos de solos, pois são mais representativos na presente área de estudo, predominantemente, os solos rasos e profundos de montante a jusante, respectivamente; optou-se por não utilizar a cartografia da geologia e/ou litologia por possuírem informações generalizadas das classes e, por isso, a cartografia dos solos demonstra melhor as condições de infiltração na bacia hidrográfica.

A elaboração da variável CN foi de acordo com método da SCS (*Soil Conservation Service*) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, que considera três condições antecedentes de umidade dos solos (AMC) para a estimativa do CN – *Curve Number* (Sartori *et al.*, 2005):

- a) AMC I - Condição em que os solos de uma bacia estão secos, mas não o suficiente para o ponto de murchamento das plantas;
- b) AMC II: Condição em que os solos encontram-se na “umidade ideal”, isto é, nas condições que precederam uma inundação fluvial máxima anual;
- c) AMC III: Condição em que os solos de uma bacia encontram-se quase saturados, quando da ocorrência de chuvas fortes ou fracas durante cinco dias anteriores a uma determinada chuva.

Portanto nesse estudo, utilizou-se AMC II que considera a condição média e normais do valor de CN. Inicialmente calculou o CN acumulado, em cada célula, ao cruzar com a direção de fluxo da área de estudo e, depois, o CN médio (\overline{CN}) com a divisão do CN acumulado pela área de estudo acumulada:

$$\overline{CN} = \frac{CNAc}{Ac}$$

Onde:

$$\overline{CN} = \text{CN médio;}$$

CNAc = CN acumulado;

Ac = área acumulada (n.º de células).

3.3.7.2 Ponderação e integração das variáveis do modelo conceitual de suscetibilidade as inundações fluviais

Calculadas as variáveis espaciais procedeu-se à elaboração e identificação das funções para cada fator, com vista à padronização [0, 1] dos valores; para isso, foram utilizadas funções lineares (Quadro 3.41).

Quadro 3.41 – Variáveis médias do modelo conceitual e equações de regressão linear.

Fatores	Função linear
Área acumulada	$y = 2^{-7}x$
Declive médio	$y = 2^{-5}x$
CN médio	$y = 1^{-5}x$

Na sequência, as variáveis espaciais (fatores) foram integradas através de um processo iterativo de análise multicritério (AMC) num SIG.

Nesse processo, se realizou ponderações dos fatores (área de estudo acumulada, declive médio e CN Médio) e teve como ponto de partida a maior pontuação para Área acumulada (Ac). Os resultados dos ensaios da modelagem da suscetibilidade foram, de forma iterativa, confrontados com os pontos de registros de ocorrências de inundações fluviais, a partir da consulta no inventário de ocorrência de inundações fluviais e, dessa forma, realizou-se também a validação do modelo.

3.4.7.2 Inventário de ocorrência de cheias

O inventário de ocorrência de inundações fluviais foi estruturado num banco de dados geográfico a partir das informações em jornais e matérias disponíveis em

meio eletrônicos, em documentos com registro de inundações fluviais: Avadan (avaliação de danos); Nopred (Notificação Preliminar de Desastres); e decretos publicados de situações de estado de calamidade pública disponível no banco de dados S2iD – Sistema de Informação de Desastres do ministério da integração Nacional do Brasil.

As marcas de inundações fluviais identificadas nos setores na bacia hidrográfica no estado de Pernambuco foram localizadas com base em documentos da Defesa Civil Nacional do Brasil, nos documentos AVADAN e NOPRED e, assim, foi possível apontar a sua localização aproximada. Nos setores montante e intermédio, os pontos de localização das inundações fluviais foram identificados pelos logradouros, locais de ocorrência das inundações fluviais, locais com alagamentos ou enxurradas que causaram perdas e danos (Figura 3.72).

No setor intermédio e jusante, no estado de Alagoas utilizou-se também os registros das marcas de inundações fluviais aferido *in situ* por meio de GPS - Sistema de Posicionamento Global Geodésico de alta precisão, dados que foram cedidos pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas - SEMARH/AL (Figura 3.72).

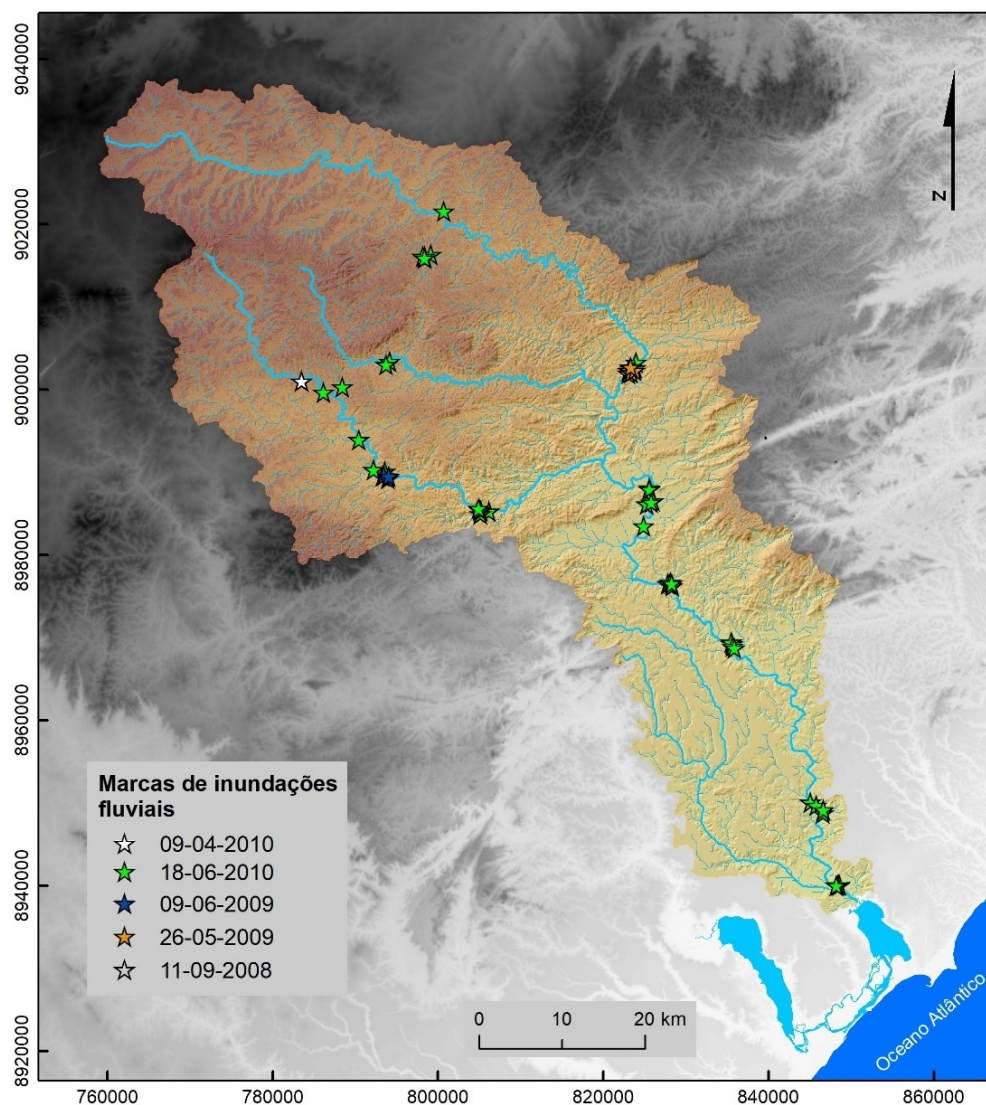


Figura 3.72 – Localização dos pontos de registros de inundações fluviais, de acordo com os dados da Defesa Civil Nacional do Brasil e de levantamento de campo

Esse levantamento correspondeu às marcas de inundações fluviais ocorridas em 2010 onde foram georreferenciados e coletados os pontos nas cidades ribeirinhas situadas no estado de Alagoas: Santana do Mundaú; São José da Lage; União do Palmares; Branquinha; Murici; Rio Largo; Satuba (Quadro 3.42). Como resultado do levantamento das ocorrências das inundações fluviais na bacia hidrográfica foram identificados 58 casos (Figura 3.72). As cidades mais atingidas pelas inundações fluviais estão situadas no setor intermédio e inferior da bacia

hidrográfica: São José da Lage; Santana do Mundaú, União dos Palmares; Branquinha (Quadro 3.42).

Quadro 3.42 – Registros de inundações fluviais utilizados na validação do modelo conceitual de suscetibilidade a inundações fluviais.

Data do evento	Cidades atingidas	UF	Nº	Fonte
18/06/2010	São José da Lage, Santana do Mundaú, União dos Palmares, Branquinha e	AL	34	Semarh
18/06/2010	Angelim, Palmeirina, Correntes	PE	14	Avadan
09/04/2010	Garanhuns	PE	1	Avadan
26/05/2009	São José da Lage	AL	4	Avadan
09 /06/2009	Correntes	PE	4	Avadan
11/09/2008	Garanhuns	AL	1	Avadan

3.4.7.3 Variáveis hidrológicas de grupo hidrológico do solos e modelo CN(*Curve Number*)

Em relação às variáveis do modelo, o resultado da espacialização dos grupos hidrológicos dos solos (Figura 3.73) mostra que há predomínio dos grupos C e D, que representam 76,7 % da área de estudo e as classes A e B correspondem a 23,3 % (Figura 3.74). Os grupos C e D representam solos que quando molhados apresentam baixa taxa de infiltração e proporcionam condições ideais para o escoamento superficial.

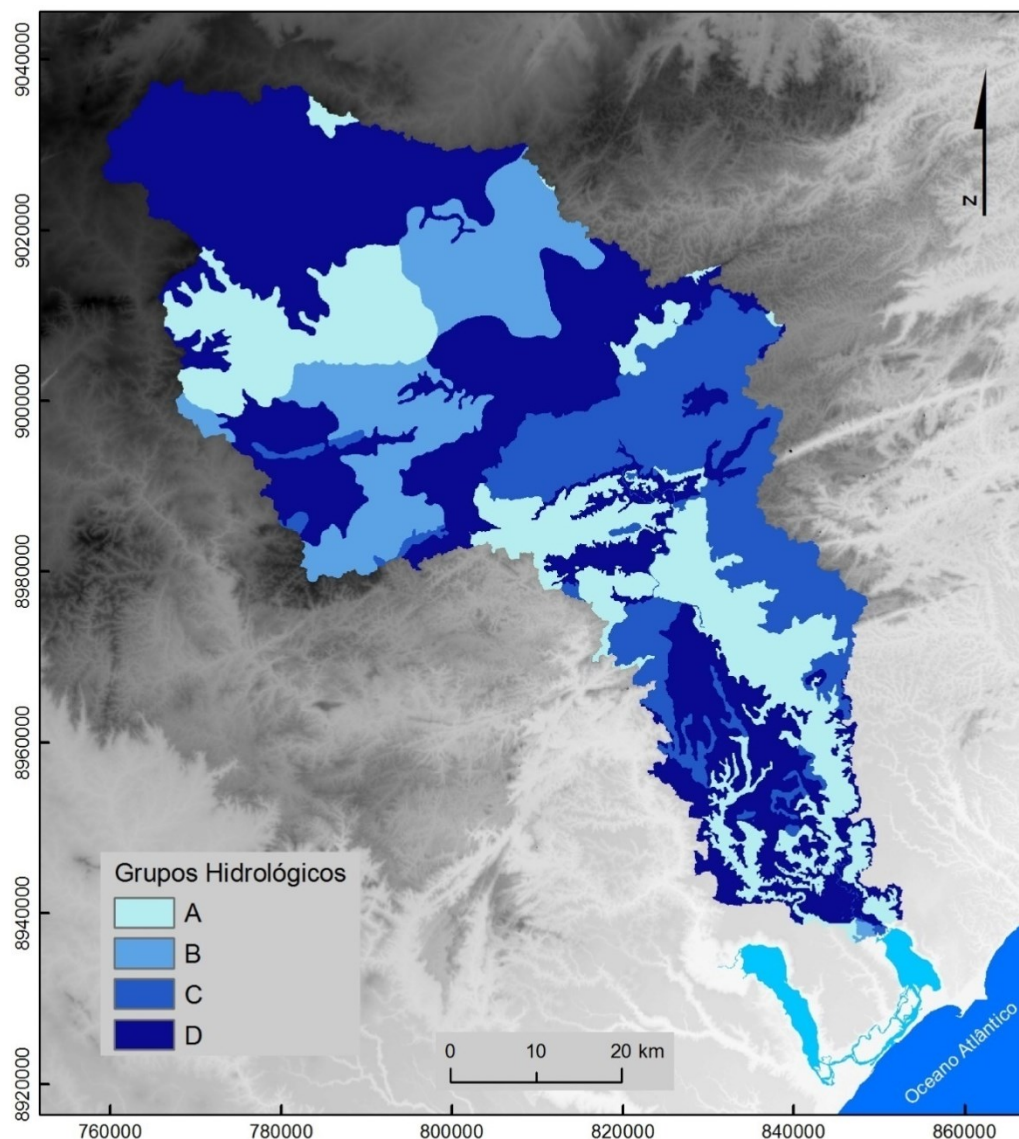


Figura 3.73 – Grupo hidrológico dos solos da área de estudo.

Apenas os Latossolos Amarelo (Vermelho - Amarelo) foram agrupados na Classe A, que representam os solos com maiores taxas de infiltração, seguido pelos Neossolos Quatzarénicos que compõem os solos do grupo B.

Os solos do grupo hidrológico C são os Argissolos vermelho e vermelho amarelo, e do grupo D, os Neossolos litólicos e os Planossolos rasos que, em sua maioria, estão situados no setor montante e central da bacia hidrográfica. Também se enquadram nesse grupo os solos saturados sob influência da variação do lençol

freático, os Neossolos flúvicos e os Gleissolos, situados no setor intermédio e os solos de Mangue na área da foz do rio Mundaú.

Na bacia hidrográfica há predominio dos solos do grupo C e D (Figura 3.80) que, associado a altos declives, proporcionam a intensificação do escoamento superficial e tornam os canais de drenagens mais propensos as inundações fluviais, principalmente no setor inferior da bacia hidrográfica, que recebe o escoamento superficial acumulado das drenagens fluviais de montante e do setor central, os quais possuem maior área e densidade de drenagem fluvial.

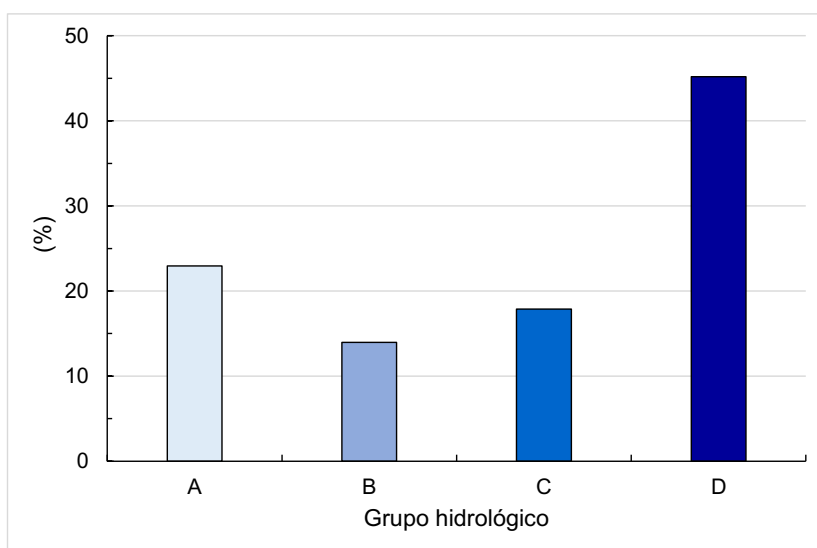


Figura 3.74 – Frequência relativa (%) dos grupos hidrológicos dos solos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Quanto aos resultados da variável CN, apresenta predomínio do intervalo de classe [75 – 85] em 36,6 % da área de estudo, seguido pelo intervalo de classe [65 – 75] que abrange 27,2 %; ambas as classes encontram-se bem distribuídas nos setores de montante, intermédio e de jusante da área de estudo (Figuras 3.75 e 3.76).

Os valor médio de CN (79,5) na área de estudo indica elevado potencial de geração e propagação do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

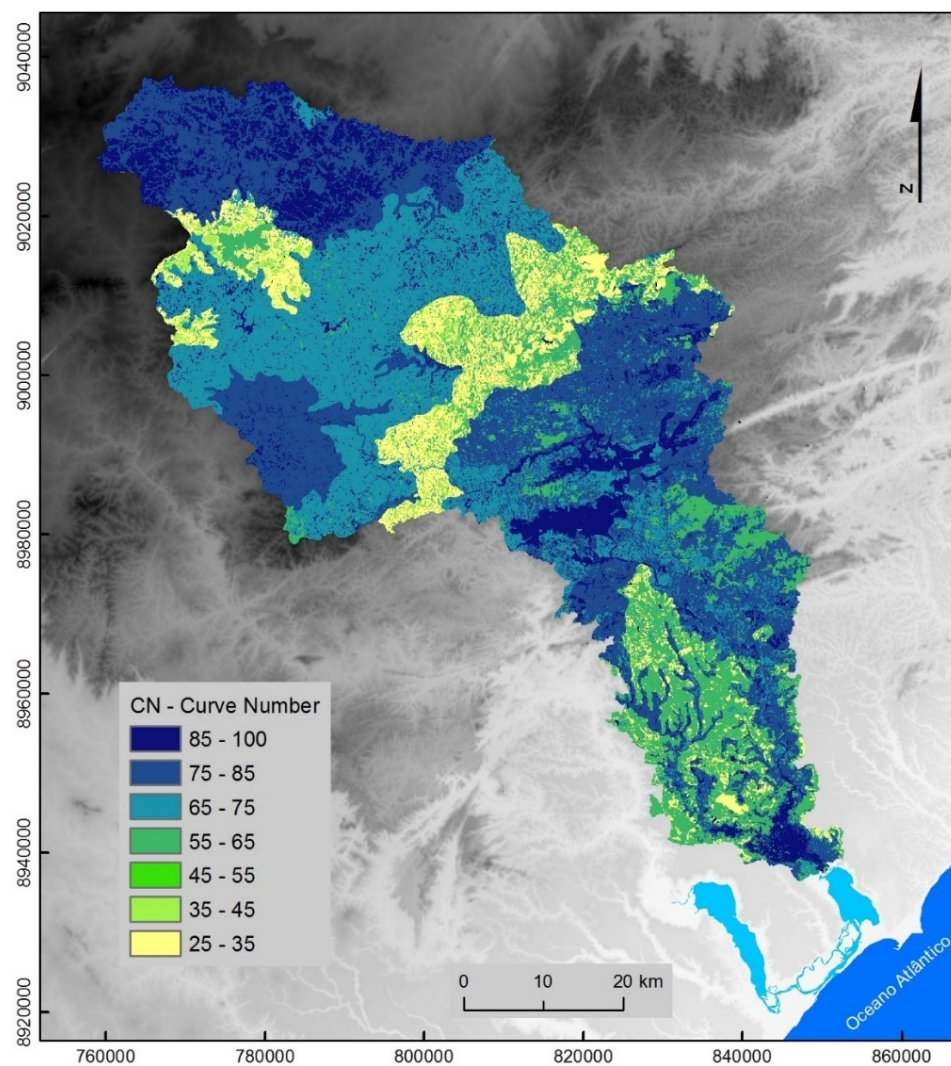


Figura 3.75 – Variável CN – Curve Number da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

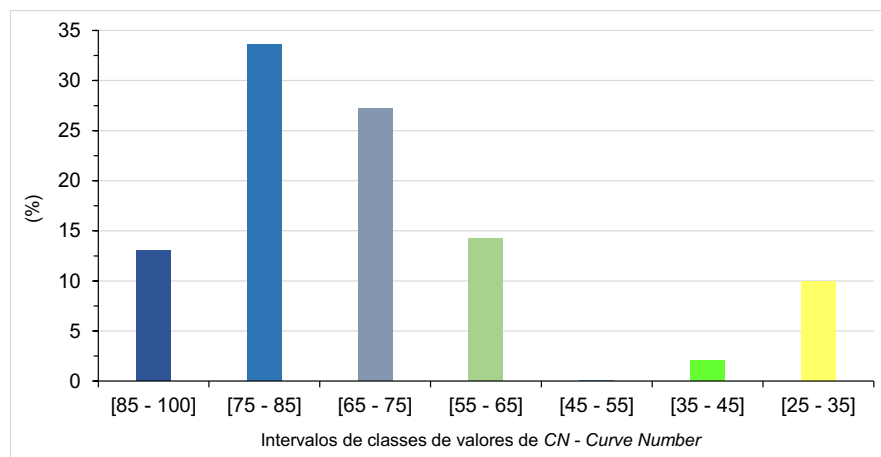


Figura 3.76 – Frequência relativa (%) das classes de valores de CN na área de estudo.

3.4.6.3 Suscetibilidade a inundações fluviais

O modelo conceitual de suscetibilidade a inundação fluvial teve, como resultado da ponderação das variáveis, o peso de 0,6 para a área acumulada, 0,3 para o declive médio e 0,2 para o *CN – Curve Number* médio. O resultado do modelo conceitual (Figura 3.77) é apresentado em 6 níveis de suscetibilidade em intervalos de classes definidos por quebras naturais (*natural break*), os quais foram especializados para os fundos de vale e planos adjacentes. Os resultados foram os seguintes:

- Extremamente elevada (1): [0,462 - 0,594] corresponde a 62,92 km de extensão de cursos d'água, predominante no setor jusante, que recebe por acumulação o escoamento concentrado dos canais fluviais maiores e dos afluentes de montante. Portanto, torna-se assim, o setor de drenagem fluvial de maior perigosidade na bacia hidrográfica onde estão situadas as cidades ribeirinhas de Murici, Rio Largo e Satuba na margem esquerda do rio Mundaú;
- Muito elevada (2): [0,258 - 0,462] inicia no setor de confluência das drenagens fluviais de montante dos rios Mundauzinho, Inhumas e Canhotinho caracterizando um ponto crítico de acumulação do escoamento

superficial concentrado ao longo de 39,86 km de extensão que perpassa as cidades ribeirinhas de União dos Palmares e Branquinha, ambas situadas na margem esquerda do rio Mundaú;

- Elevada (3): [0,172 - 0,258] se restringiu a 12,25 km de extensão do rio Canhotinho situado num trecho sinuoso no setor central da bacia hidrográfica que recebe contribuição de acumulação dos rios Inhumas e Caruru;
- Moderada (4): [0,082 - 0,172] a totalidade dessa classe de suscetibilidade abrange 102,42 km de extensão onde estão situadas as cidades ribeirinhas ao longo do rio Mundauzinho, onde estão as áreas urbanas de Correntes e Santana do Mundaú e, no rio Canhoto, a cidade ribeirinha de São José da Lage;
- Baixa (5): [0,027 - 0,082] corresponde a 129,95 km de extensão nos trechos de drenagens fluviais no setor montante e intermédio e, no inferior, rio Satuba que mantêm importância na contribuição do escoamento superficial para o setor jusante;
- Muito baixa: [0,004 - 0,027] compreende um conjunto de afluentes de drenagem fluvial que totalizam 384,3 km de extensão, com menor potencialidade de acumulação do escoamento superficial concentrado.

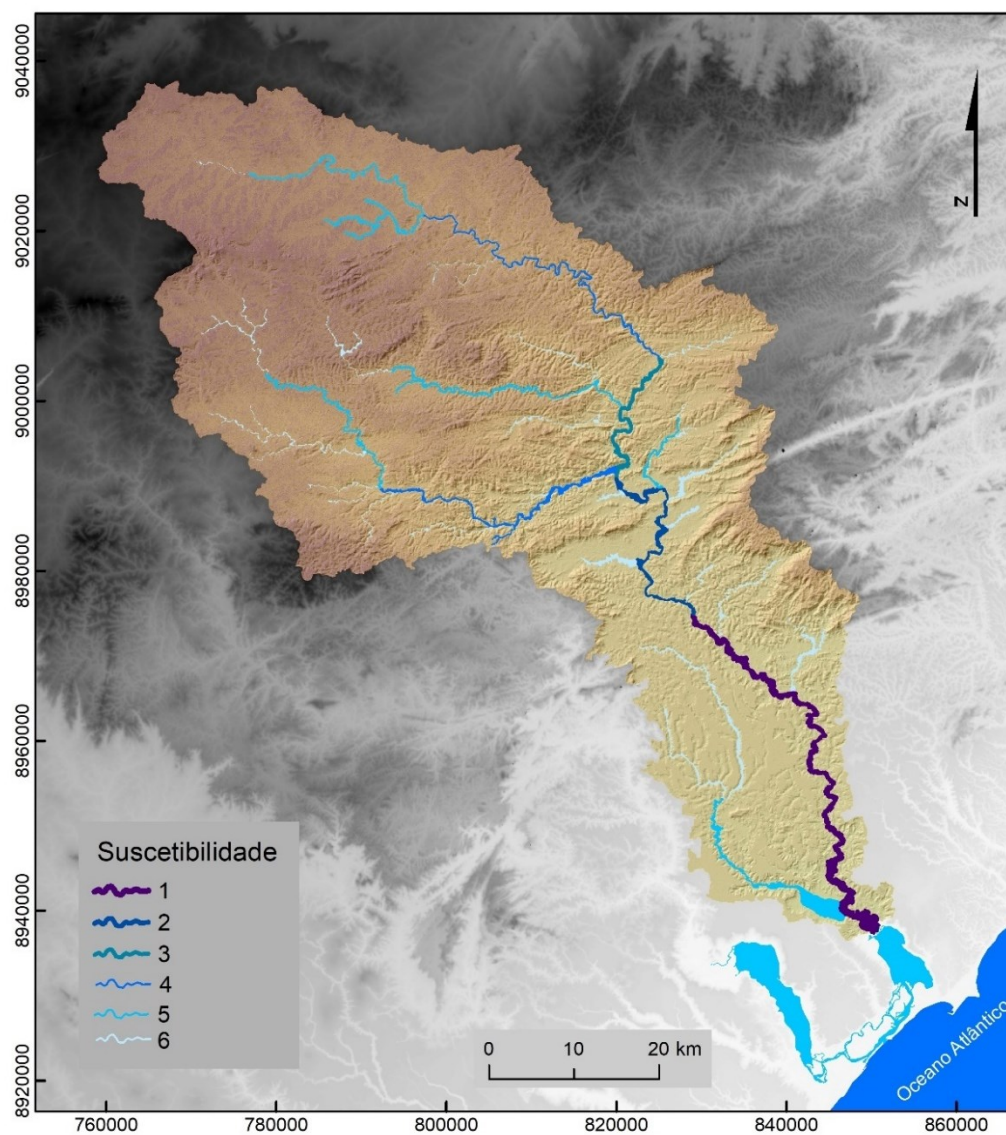


Figura 3.77 – Suscetibilidade a inundações flúvias dos cursos d'água na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Logo, vale destacar que os cursos d'água com suscetibilidade elevada e extremamente elevada às inundações flúvias abrangem 115,03 km de extensão na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

3.4.6.4 Interação espacial do modelo conceitual com os registros de cheias

Quanto aos resultados da suscetibilidade e ao processo de concordância espacial com os registros de ocorrência de inundações fluviais, a suscetibilidade extremamente elevada correspondeu à maior quantidade de registros de marcas de inundações fluviais seguido pela suscetibilidade muito elevada e moderada (Quadro 3.43).

Observou-se, dos resultados anteriores, que as classes de suscetibilidade extremamente elevada e muito elevada somam, em conjunto, 26 registros de inundações fluviais, ou seja, 44,8 % do total. Coerentemente, as menores correspondências das classes de suscetibilidade com os registros de inundações fluviais deram-se nos cursos d'água de baixa a muito baixa suscetibilidade (Figura 3.78).

Quadro 3.43 – Níveis de suscetibilidade e registros de inundações fluviais.

	Suscetibilidade	Registros de ocorrência de inundações fluviais
1	Extremamente elevada	15
2	Muito elevada	11
3	Elevada	9
4	Moderada	10
5	Baixa	8
6	Muito Baixa	5
	Total	58

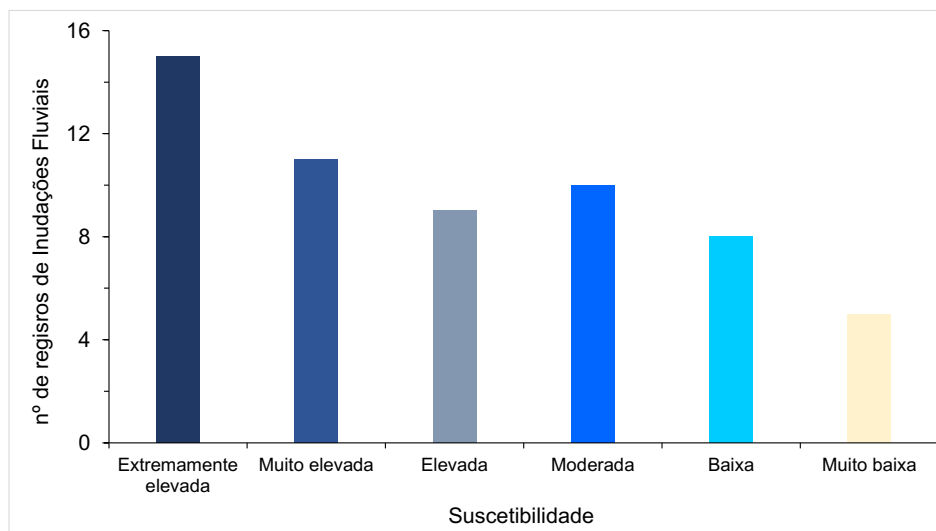


Figura 3.78 – Classes de suscetibilidade associada aos registros de inundações fluviais utilizado na validação do modelo conceitual.

3.4.6.5 Discussão e conclusão dos resultados

Por regra, o modelo prioriza a acumulação no processo de ponderação, por isso foi dado maior peso a este fator, seguido pelo declive médio que está concentrado nos setores montante e, conseqüentemente, a variável *CN* médio recebeu o menor valor no processo de hierarquização das variáveis por Análise Multicritério (AMC).

O modelo mostrou a suscetibilidade inerente aos canais fluviais a partir das variáveis físicas e antrópicas; assim foi possível observar a maior acumulação do escoamento concentrado no setor jusante no rio Mundaú, de suscetibilidade elevada a extremamente elevada, evidentemente por serem setores que recebem significativa acumulação de montante onde a densidade de drenagem é maior, a forma da bacia hidrográfica é mais larga e maiores declives como também os valores de *CN* são mais elevados.

Com efeito, o trecho do rio Mundaú onde se inicia a suscetibilidade extremamente elevada apresenta maior área de inundação fluvial com maior volume de água e acumulação de sedimentos. Nesse setor jusante, estão situadas as infraestruturas locais e as populações ribeirinhas.

Além disso, na região da foz do rio Mundaú, a combinação de elevadas vazões e a elevação do nível d'água da laguna Mundaú, por influência da maré, intensifica o fenômeno de inundações fluviais no setor de planície flúvio-lagunar de suscetibilidade extremamente elevada.

A maior suscetibilidade não significa necessariamente uma maior capacidade para gerar danos; vale ressaltar que, nesse setor de suscetibilidade extremamente elevada, embora chegue mais água, a dinâmica deve ser menor e o espraiamento pela planície aluvial também vai ajudar a diminuir a velocidade da água, ou seja, maior suscetibilidade e maior área alagada, mas menos capacidade destruidora.

Esta capacidade destruidora é maior um pouco a montante, no setor intermédio, onde as vazões são elevadas e onde o escoamento se faz ao longo de superfícies mais inclinadas (vertentes e leitos dos rios), portanto, com maior energia e potencial de arrastamento; isto apesar das vazões serem mais baixas e a suscetibilidade ser inferior à dos trechos de rios mais a jusante.

No setor intermédio a suscetibilidade é muito elevada devida à confluência das drenagens dos rios Mundauzinho (drenagem da margem direita), trecho com suscetibilidade moderada, com o rio Canhotinho de suscetibilidade elevada, que intensificam a concentração de escoamento e fazem resultar na suscetibilidade muito elevada (2), num setor de forte acumulação no rio Mundaú e, como mencionado, de capacidade destruidora (Figura 3.79).

Além do mais, as contribuições dos afluentes de suscetibilidade muita baixa da margem esquerda do rio Mundaú (riacho Seco, riacho Sueca, Cana-Brava e o riacho Macacos) e os da margem direita (rio Jiritana e riacho do Bode) contribuem para acumulação do escoamento concentrado no talvegue do rio Mundaú de suscetibilidade muito elevada (Figura 3.80 e Figura 3.81).

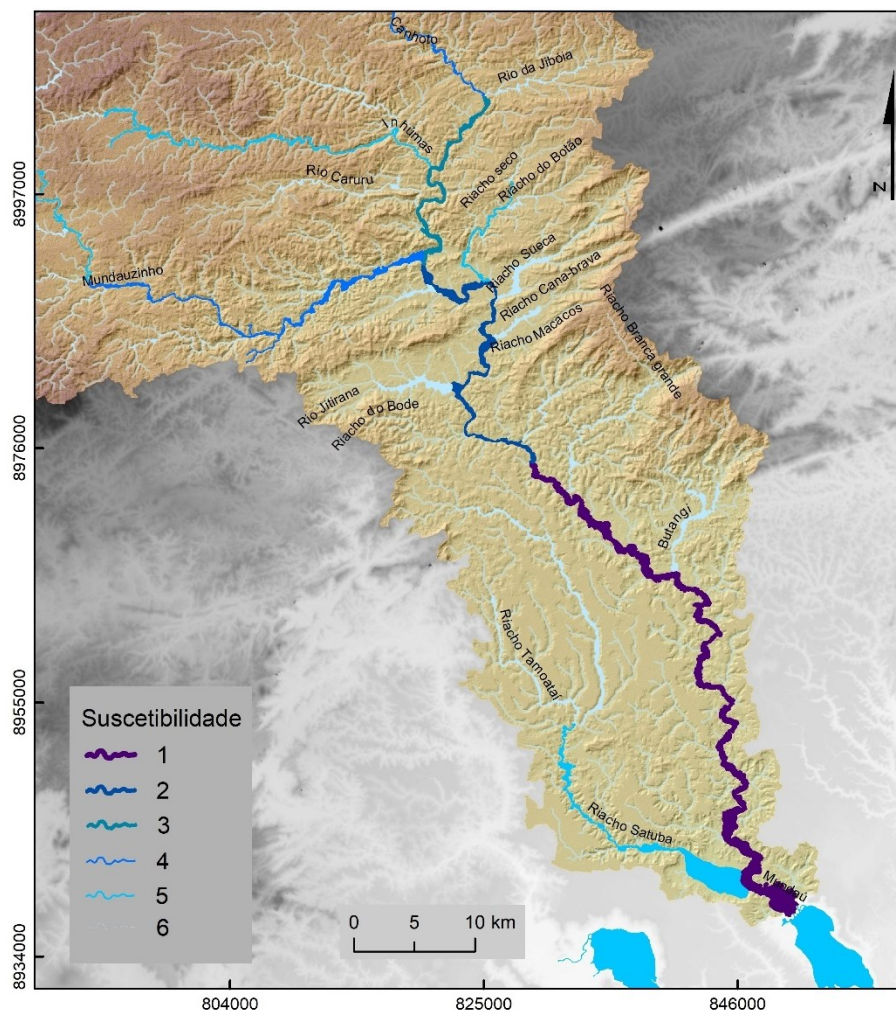


Figura 3.79 – Representação espacial da suscetibilidade a cheias do setor jusante da bacia hidrográfica da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Ainda no setor intermédio da bacia hidrográfica, é de elevada suscetibilidade por receber a acumulação do rio Canhoto dos seus afluentes e do rio Inhumas e Caruru que resulta na elevada suscetibilidade no trecho do rio Canhotinho. Este curso d'água recebe acumulação decorrente dos solos rasos e tipos de uso do solo de montante que eleva os valores acumulados médios de CN (*Curve Number*) (Figura 3.80).

A suscetibilidade se apresenta baixa a muito baixa nas drenagens fluviais do setor superior da bacia hidrográfica, no rio Canhoto, rio Inhumas e Mundauzinho; no setor inferior, no rio Satuba. Estas classes de suscetibilidade merecem importância

pois os afluentes perenes têm influência na acumulação do escoamento superficial concentrado para o talvegue, por exemplo, o riacho Cana-brava, braço esquerdo do rio Mundaú, no município de União do Palmares, que corresponde a uma sub-bacia com registros de ocorrência de alagamentos associada a alterações humanas decorrentes de obras de infraestruturas hidráulicas (3.80).

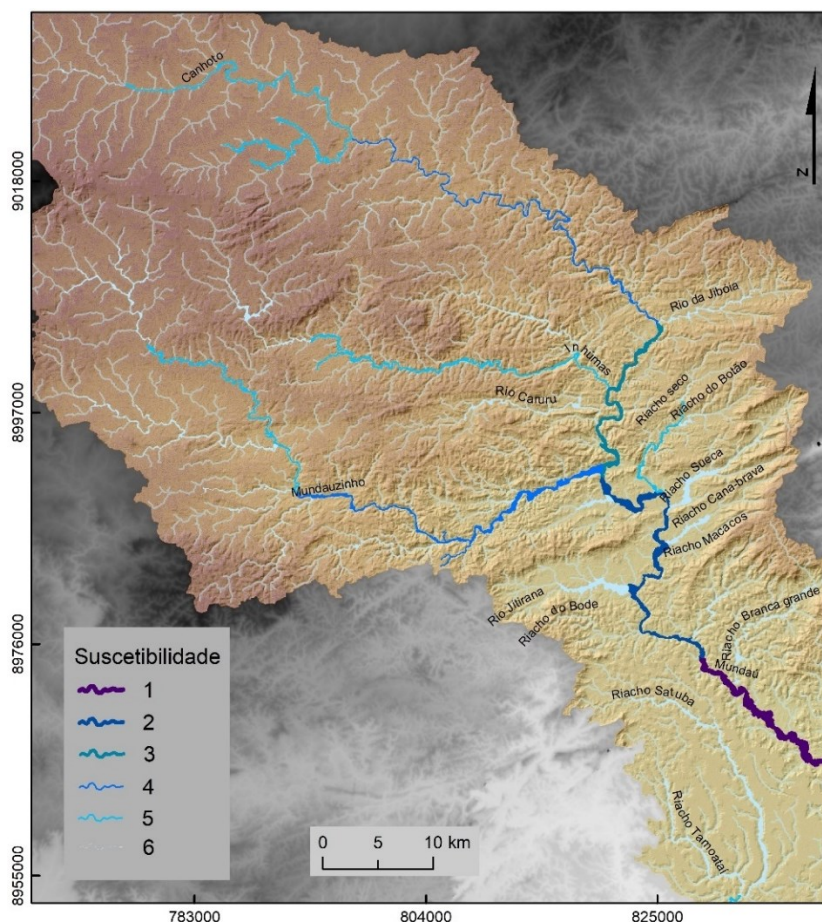


Figura 3.80 – Representação espacial do setor central de bifurcação dos rios Mundaúzinho, Inhuma e Canhotinho e a suscetibilidade na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Assim como no setor jusante, os rios Satuba e o riacho Tamoatá com suscetibilidade muito baixa contribuem na acumulação do escoamento superficial concentrado para o rio Caboclo de suscetibilidade baixa. Nesse setor jusante, a influência da região estuarina pode intensificar as inundações fluviais e aumentar

a suscetibilidade desse canal de drenagem fluvial, mas o modelo não representa esse fluxo de acumulação do sentido estuário – rio (Figura 3.81).



Figura 3.81 – Setor de planície fluvial a jusante da bacia hidrográfica, trecho fluvial do riacho Caboclo com delimitação da planície fluvial (linhas em branco) e fluxo do rio em direção (seta em azul) a região estuarina da laguna Mundaú região de sua foz

De acordo com a elaboração e aplicação do modelo conceitual de inundação fluvial, pode constatar que as condições naturais da bacia hidrográfica representadas pelos fatores de predisposição à inundação fluvial (solos, declividade, acumulação da área de estudo e as condições ambientais, representada pelo uso do solo) por si só indicam a predisposição da bacia hidrográfica à ocorrência de inundações fluviais.

Logo, o modelo conceitual de inundações fluviais se torna uma peça chave e direta na avaliação da suscetibilidade as inundações fluviais nos canais de drenagens fluviais ao identificar os setores perigosos à escala da bacia hidrográfica, para dar suporte ao gerenciamento dos riscos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

3.4.7 Rompimento de barragens de terra na bacia hidrográfica do rio Mundaú

Além dos perigos naturais de erosão hídrica dos solos, deslizamentos de terras e inundações fluviais, já caracterizados, há também na bacia hidrográfica do rio Mundaú perigos tecnológicos. Estes incluem rompimento de reservatórios/barragens e acidentes industriais relacionados a inundações fluviais

3.4.7.1 Principais perigos tecnológicos decorrentes da presença de barragens de terras no setor de montante na bacia hidrográfica do rio Mundaú

O perigo de rompimentos de reservatórios/barragens na bacia hidrográfica do rio Mundaú, é relacionada com a presença de barragens de terra; os barramentos são destinados a diversos usos: irrigação, dessedentação de animais, abastecimento humano e uso industrial (Figura 3.82).

Assim, foram descritos os perigos de rompimentos associados aos maiores reservatórios/barragens em operação na área de estudo, situados nos setores montante e intermédio da bacia hidrográfica; a jusante desses reservatórios estão os núcleos populacionais, propriedades rurais e vilarejos expostos ao perigo de serem atingidos pela força das águas decorrentes desses acidentes (Figura 3.83).

No setor de cabeceira está a barragem Cajarana, no rio Canhoto, e nas drenagens fluviais da margem direita estão as barragens Mundaú e Mundaú II (Cajueiros), situadas no rio Mundauzinho; a barragem Inhumas está situada no setor montante do rio de mesmo nome e, a jusante, no setor intermédio na mesma sub-bacia está a barragem Espeto; ambas as barragens estão em operação nas drenagens fluviais afluentes do rio Canhoto (Figuras 3.82 e 3.83; Quadro 3.44).

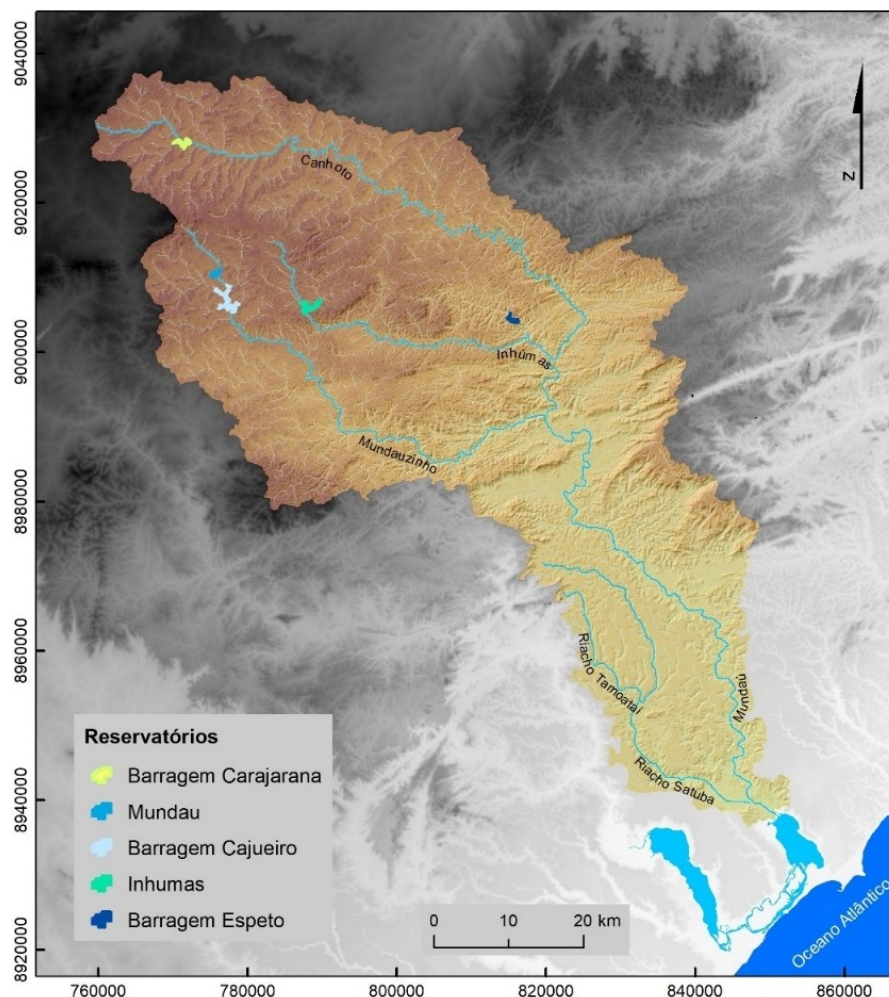


Figura 3.82 – Localização dos maiores reservatórios de água situados no setor montante da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Quadro 3. 44 – Características dos principais reservatórios situados a montante na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Reservatórios	CC (m)	Área de drenagem	Capacidade máxima (m³)	Uso	Estrutura
Cajarana	102,5	114	2.594.280	Irrigação	Terra
Mundaú	716,0	32	1.968.600	Abastecimento e irrigação	Terra
Mundaú II (Cajueiro)	687,5	169	19.283.196	Outros usos	Terra
Inhumas	-	103	7.872.860	Abastecimento	Concreto
Espeto	-	123,8	-	Abastecimento	Terra

CC: Cota de coroamento.

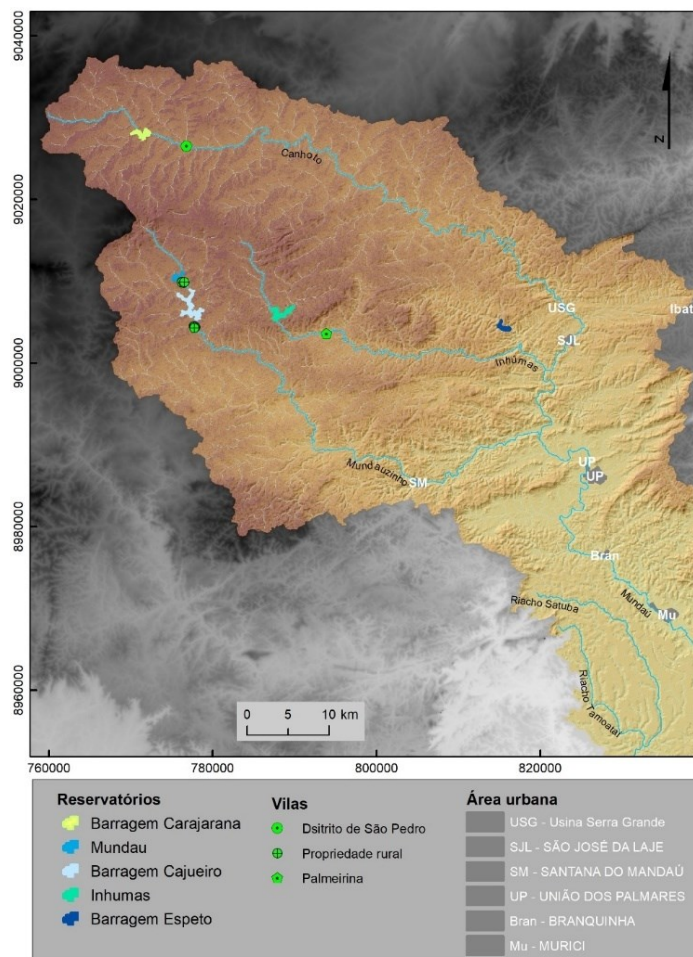


Figura 3.83 – Localização dos reservatórios barragem e as áreas urbanas e propriedades rurais.

O reservatório mais a montante, Cajarana, é a principal fonte de abastecimento de águas para a população local do povoado São Pedro e para produção agrícola local. Pela estrutura de terra se torna suscetível a um eventual rompimento e pode expor ao perigo a população do distrito de São Pedro, situado a aproximadamente 5 km do reservatório; de acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e

Estatística) em 2010 a população desse distrito é de 5967 habitantes (Figura 3.84 e Quadro 3.44).



Figura 3.84 – Imagem do reservatório Cajarana, construído com estrutura de terra (indicada pela seta em amarelo) (imagem da plataforma GoogleEarth, 19/10/2019).

No curso d'água do rio Mundauzinho ao longo de 2 km no setor montante estão presentes em série os reservatórios Mundaú e Mundaú II (Cajueiro); ambas as barragens são de terra (Figuras 3.85 e 3.86).

Portanto, os perigos de rompimentos e transporte de massa de carga sólida para jusante expõe ao perigo os núcleos populacionais rurais e, também, a infraestrutura da barragem Mundaú II (Cajueiro) que, ao romper-se, intensifica ainda mais a energia de transporte de massa de água e carga sólida e expõe ao perigo os núcleos rurais e infraestruturas situados a jusante nos rios Mundauzinho e ao longo do rio Mundaú (Figuras 3.86 e 3.87).



Figura 3.85 – Imagem do reservatório Mundaú I, construído com estrutura de terra (indicada pela seta em amarelo) (imagem da plataforma GoogleEarth, 19/10 2018).



Figura 3.86 – Imagem do reservatório Mundaú II – Cajueiro, construído com estrutura de terra (ndicada pelas seta em amarelo) (Imagem da plataforma GoogleEarth data:15/12/2018



Figura 3.87 – Vista do reservatório Mundaú II – Cajueiro, construído em estrutura de terra.

De entre as barragens supracitadas, a barragem Inhumas, construída para fins de abastecimento de água é a única que possui estrutura de concreto; pela sua estrutura é a que menos oferece perigo de rompimento (Figuras 3.88 e 3.89).

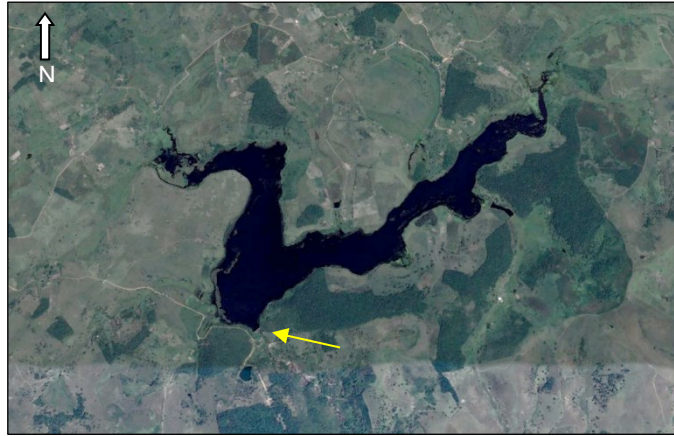


Figura 3.88 – Imagem do do reservatório Inhumas, com estrutura de concreto (indicada pela seta em amarelo) (plataforma GoogleEarth, 25/09/2019).



Figura 3.89 – Vista frontal do reservatório/barragem Inhumas em estrutura de concreto e vertendo água.

Noutro afluente do rio Canhoto, a jusante da barragem Inhumas encontra-se a barragem de terra Espeto destinada ao uso agrícola (Figura 3.90). Essa barragem está em operação e mantém afluência para o rio Canhoto; a cidade ribeirinha mais próxima, a jusante, União dos Palmares, situada em leito inundável e parte da

cidade permanece exposta ao escoamento e transporte de carga sólida proveniente de um eventual rompimento de barragem.



Figura 3.90 – Reservatório/barragem Espeto construído com estrutura de terra indicado pela seta em amarelo (imagem da plataforma GoogleEarth data: 06/12/2016).

Se observa que as barragens, devido à sua posição no setor montante da bacia hidrográfica, estão situadas em troços com drenagens fluviais de baixa acumulação do escoamento superficial concentrado identificados no modelo conceitual de inundações fluviais. Mas as estruturas das barragens feitas de terra implicam perigo de colapso dessas estruturas, seja pela infiltração da água que ultrapassa as barragens, sejam pelo desgaste por erosão lateral da estrutura da barragem que, assim, expõem ao perigo os pequenos núcleos rurais e povoados situados a jusante dos reservatórios/barragens.

Para melhor avaliar o perigo de rompimento das barragens supracitadas na bacia hidrográfica tentou-se realizar a modelagem hidráulica dos reservatórios para conhecer a propagação escoamento e área inundável. No entanto, as informações de base disponíveis, especificamente a altimetria, não permitiram realizar esta análise com a qualidade desejável, visto que não permitiram obter as secções transversais dos fundos de vales de forma fidedigna.

3.4.7.2 Acidentes industriais associados a inundações fluviais

Para além do perigo de rompimento dos reservatórios/barragens de estruturas de terra, há também, nos setores intermédio e jusante, as indústrias de produção de açúcar e álcool (etanol) expostas a um eventual rompimento de barragem a montante e a inundação fluvial nos rios Mundauzinho, Canhotinho, Mundaú e entorno.

Assim constata-se que, nos setores intermédio e jusante da bacia hidrográfica, em território alagoano, encontram-se expostas ao perigo de inundações fluviais as seguintes indústrias (Figura 3.91):

- i) Usina Serra Grande;
- ii) Usina Laginha;
- iii) Usina Santa Clotilde;
- iv) Timac Fertilizantes Agrícolas.

Estas áreas industriais estão expostas aos perigos de serem atingidas por massas de água e carga sólida e, conseqüentemente, sofrerem danos materiais e perdas de vidas dos respetivos trabalhadores/funcionários visto que nesses setores as inundações fluviais são recorrentes; são troços fluviais de suscetibilidade moderada a extremamente elevada, onde o eventual rompimento de barragem a montante aumentará e intensificará a inundação fluvial nos locais onde estão instaladas as indústrias de produção de açúcar e álcool e de fertilizantes agrícolas (ver item 3.91).

Os produtos químicos armazenados, provenientes da produção de açúcar e álcool não apresentam perigosidade que possam causar perdas de vida às populações locais, mas sim impactar negativamente o ecossistema aquático.

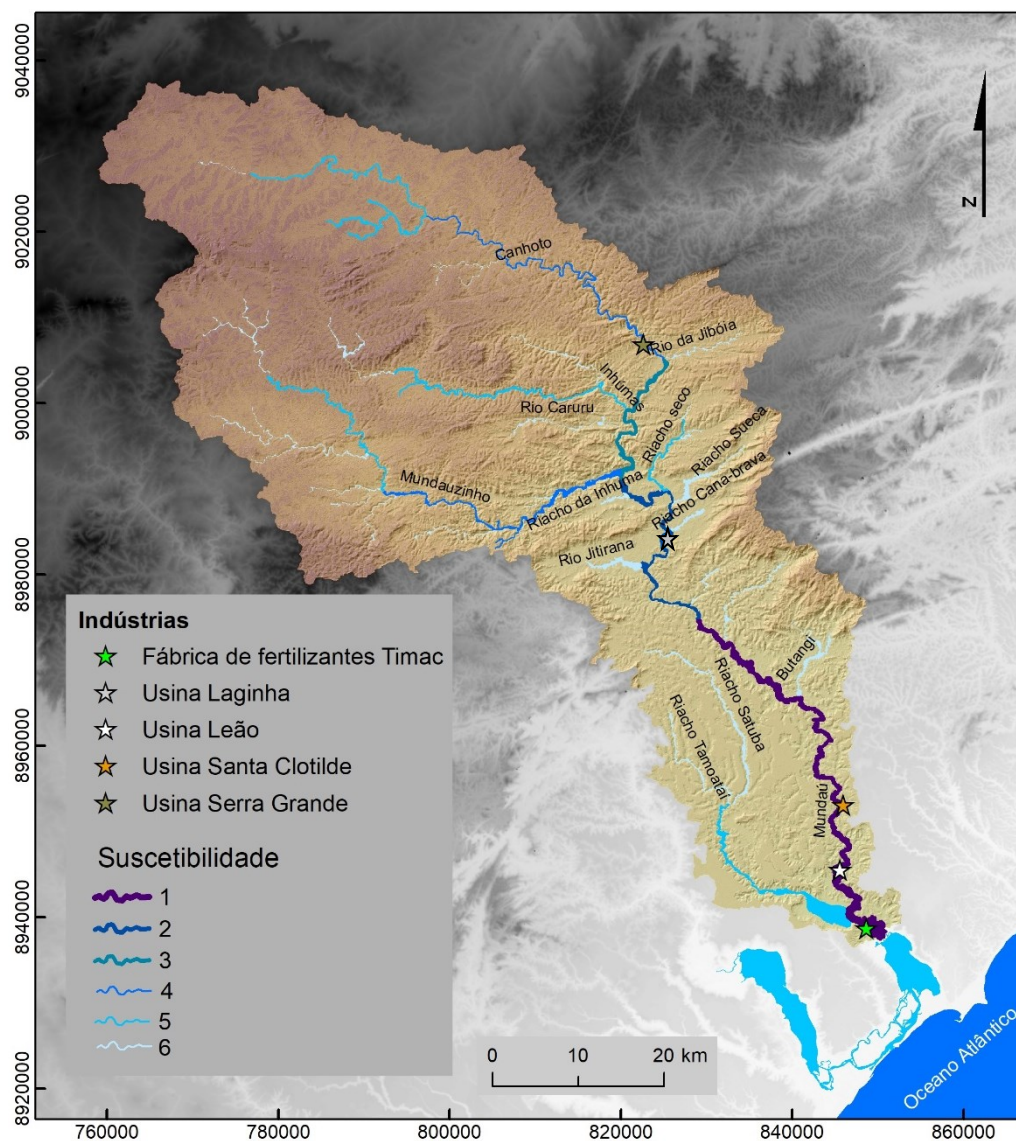


Figura 3.91 – Localização das indústrias situadas a jusante e a suscetibilidade dos cursos d'água ao longo da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

As indústrias de produção de açúcar e álcool estão nos setores mais suscetíveis a inundações fluviais. Nesse sentido, enquadraram-se as indústrias situadas nas margens dos cursos d'água com os setores suscetíveis a inundações fluviais apontadas no modelo conceitual de suscetibilidade: moderada no rio Canhotinho; muito elevada e extremamente elevada, no rio Mundaú (Figura 3.91).

Dessa maneira, pode-se observar que a indústria de produção de açúcar e álcool Usina Serra Grande encontra-se situada num trecho do rio (Canhotinho) onde o

modelo conceptual de inundação fluvial apontou suscetibilidade moderada, num setor de meandro onde a inundação fluvial tende a seguir diretamente no sentido da infraestrutura da indústria e, assim, provocar o derramamento de substâncias no rio Canhotinho. Deste ponto em diante, poderá atingir a área urbana situada 6 kma jusante, no município de São José da Lage, no curso d'água de suscetibilidade elevada a inundações fluviais (Figura 3.92).



Figura 3.92 – Localização da usina Serra Grande situada no setor de suscetibilidade moderada a cheias e área urbana de São José da Lage a jusante com suscetibilidade elevada.

Situada a jusante no trecho do rio Mundaú, encontra-se a indústria Laginha no município de União dos Palmares, na margem direita do rio Mundaú, em leito de inundação fluvial, num trecho do rio de forte acumulação do escoamento concentrado com suscetibilidade muito elevada (Figura 3.93). Esta indústria ao ser atingida pode derramar os materiais da produção nesse setor do rio em diante.



Figura 3.94 – Usina Laginha, município de União dos Palmares, Alagoas, situada na margem direita do rio Mundaú, onde se pode observar os seis tanques de armazenamento de álcool, antes da ocorrência da cheia de junho de 2010. Fonte: <http://www.alagoas24horas.com.br>.



Figura 3.95 – Registro da ação da cheia de junho de 2010, ao atingir a Usina Laginha, onde é possível observar apenas um dos seis tanques de armazenamento de álcool e a ausência dos restantes.

A jusante da Usina Laginha, está mais outra usina de produção de Açúcar e Álcool, situada na margem direita do rio Mundaú, a usina Santa Clotilde, localizada também em leito de inundação fluvial de suscetibilidade extremamente elevada, e que tem sofrido danos materiais decorrentes de inundações fluviais, por exemplo, na inundação fluvial de junho de 2010.

A área urbana do município de Rio Largo encontra-se aproximadamente 3 km a jusante e está sob influência de um possível vazamento de produtos industriais, associado a inundação fluvial (Figura 3.96 e 3.97).



Figura 3.96 – Enquadramento da Usina Santa Clotilde situada na margem esquerda do rio Mundaú, num setor do rio com suscetibilidade extremamente alta e, a jusante, a área urbana do município de Rio Largo.



Figura 3.97 – Usina Santa Clotilde situada a margem direita do rio Mundaú, num meandro, no município de Rio Largo, Alagoas, no momento em que foi atingida pela cheia de 20/06/2010, na figura está a orientação do norte.

Além das indústrias de produção de açúcar e álcool, está presente no setor jusante da bacia hidrográfica, próximo de sua foz, a indústria de fertilizantes agrícolas TIMAC, que dista 10 km da Usina Leão, situada a montante. A TIMAC está situada num setor de planície fluvial onde o escoamento superficial concentrado é extremamente elevado do rio Mundaú (Figuras 3.98 e 3.99). De entre as indústrias supracitadas, a TIMAC é a que mais oferece perigo de vazamento de produtos perigosos, principalmente se for atingida fortemente por uma inundação fluvial.

Os produtos químicos e os resíduos armazenados apresentam em sua composição: nitrogênio (N), pentóxido de fósforo (P_2O_5); cálcio (Ca); enxofre (S); cobre (Cu); manganês (Mn). Esses elementos químicos, ao contaminar os corpos d'água, ocasionam a depleção do ambiente aquático a partir da recepção, favorecendo o processo de eutrofização, como também podem afetar as populações locais.

Assim, o eventual vazamento de resíduos de produção e fertilizantes agrícolas dispersará os poluentes no rio Mundaú e corpos hídricos adjacentes na região da foz do rio Mundaú na Laguna Mundaú (Figuras 3.98 e 3.99).



Figura 3.98 – Imagem em detalhe da localização da indústria Leão, de produção de açúcar e álcool, e Timac, de produção de fertilizantes agrícolas, ambas situadas na margem direita do rio Mundaú, em setores de suscetibilidade extremamente elevada a inundações fluviais.



Figura 3.99 – Fábrica de tecidos da Timac Agro Indústria e comércio Fertilizantes situado as margens do rio Mundaú.

3.4.7.3 Considerações finais

Portanto, na bacia hidrográfica do rio Mundaú estão presentes os perigos tecnológicos desde o setor montante, com o perigo de rompimento dos reservatórios/barragens de terra, até aos setores intermédio e jusante, onde ocorrem indústrias que podem ser atingidas por inundações fluviais e, consequentemente, provocar derrames de material decorrente da atividade industrial de produção de açúcar e álcool e de fertilizantes agrícolas.

No setor montante há perigo de rompimento das infraestruturas das barragens de terra, são setores onde há baixa acumulação do escoamento superficial concentrado e o perigo iminente está associado à fragilidade das estruturas dos reservatórios/barragens.

Nos setores intermédio e jusante, apresenta-se como mais perigoso em virtude do perigo de inundação fluvial e exposição da indústria química de fertilizante agrícola sendo os setores de maiores acumulação do escoamento superficial concentrado. Portanto, os setores de maiores predisposições a inundações fluviais são os setores onde há atividades industriais situadas em leito de inundação fluvial de suscetibilidade moderada a extremamente elevada.

4. ANÁLISE MULTI-PERIGO DE FENÓMENOS NATURAIS E TECNOLÓGICOS

No capítulo anterior, cada um dos fenômenos perigosos foi analisado de forma independente. No entanto, fenômenos naturais que ocorrem no mesmo espaço geográfico e durante o mesmo período, tendem a ter algum tipo de interação e a evoluir de forma interligada, em que um dos fenômenos pode depender fortemente, em frequência e magnitude, da ocorrência de outro.

Assim, buscou-se analisar a interação sistemática dos fenômenos naturais perigosos na perspectiva de efeito em cascata, numa atuação em corrente dos perigos e, para tanto, desenvolve-se a metodologia de integração dos perigos a partir da elaboração de um modelo de suscetibilidade multi-perigo. A elaboração da presente metodologia de análise multi-perigo, embora constitua um ensaio, pretende preencher lacunas de avaliação multi-perigo que abordem a integração entre diferentes perigos no território e que representem de forma dinâmica os fenômenos perigosos; esta carência de avaliação dos perigos na perspectiva do efeito em cascata foi constatada na revisão bibliográfica efetuada no capítulo 1.

Com efeito, neste capítulo será abordada, do ponto de vista metodológico e prático, a integração dos perigos naturais de inundações fluviais, de erosão hídrica dos solos e de deslizamentos, assim como sua interação com os tecnológicos, numa perspectiva de efeito em cascata. Pretende-se, assim, através de ensaios de modelação elaborar o modelo de avaliação multi-perigo aplicado na bacia hidrográfica do rio Mundaú, que integre os perigos supracitados numa interação em conjunto e acumulada dos fenômenos perigosos na perspectiva de causa e efeito, ou seja, como os perigos se inter-relacionam no território e como um perigo pode intensificar a ação do outro ao longo da bacia hidrográfica e atingir os elementos expostos (infraestruturas) no território.

4.1 Danos potenciais na avaliação dos perigos

A percepção do impacto dos fenómenos perigosos no território pode ser feita de forma muito distinta, em diferentes escalas temporais e diferentes magnitudes. Smith e Ward (1998) elaboram uma classificação dos danos provocados pelas inundações fluviais, em que se combinam diferentes níveis de impactos; em larga medida, este tipo de classificação pode ser extrapolado para outros fenómenos perigosos e, inclusive, para uma combinação desses perigos.

As consequências negativas dos fenómenos naturais perigosos ocasionam danos e perdas que são sentidos de forma direta e indireta no território e os efeitos são sentidos nos elementos físicos (infraestruturas das cidades) e, consequentemente, nas vidas das pessoas. Nesse contexto, as ocorrências dos fenómenos naturais perigosos e suas consequências negativas podem ocorrer no imediato, com tradução em danos diretos, e numa escala temporal mais longa, constituindo os danos indiretos (Figura 4.1).

Os danos diretos e indiretos apresentam subclassificações: tangíveis e intangíveis. Os danos tangíveis podem ser avaliados financeiramente, enquanto nos danos intangíveis isso não é possível. E os danos tangíveis e intangíveis são definidos em primários e secundários; os danos primários, resultam do contacto direto com o fenómeno perigoso, enquanto os danos secundários ocorrem de forma indireta, algumas situações dependentes da interação com outros fenómenos.

Assim, os danos diretos podem ser tangíveis primários, de natureza física, que considera os danos nas propriedades e nas infraestruturas (culturas agrícolas, áreas urbanas, estradas, pontes, indústrias, entre outros), e tangíveis secundários, que se referem aos custos da recuperação dessas infraestruturas e atividades.

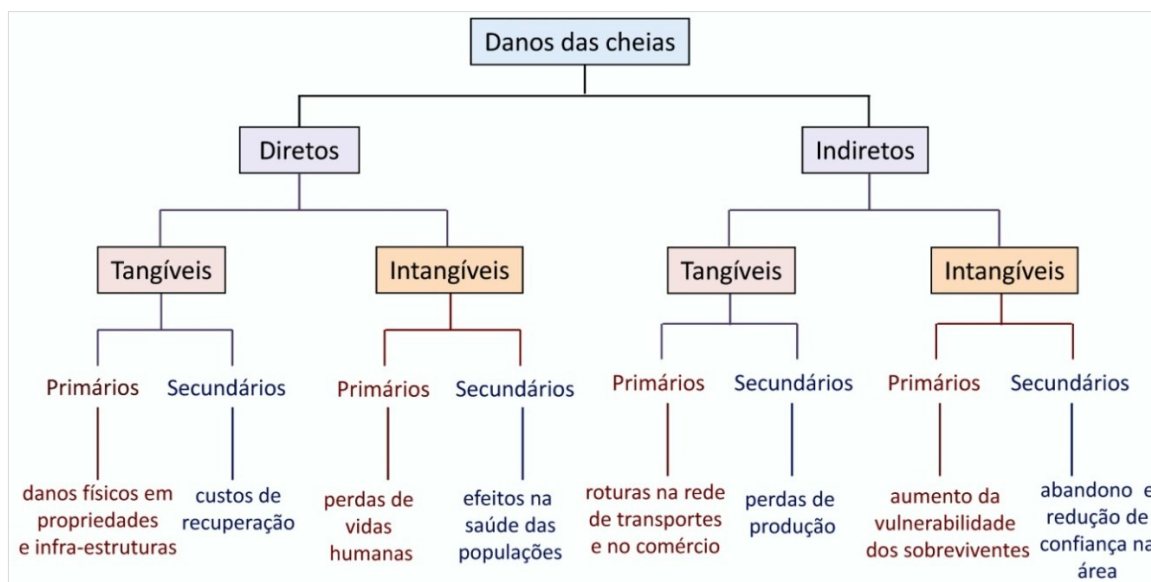


Figura 4.1 – Consequências negativas das cheias (adaptado de Smith & Ward, 1998).

Quanto aos danos diretos intangíveis, não são contabilizáveis financeiramente; os primários envolvem as perdas de vidas humanas e, noutro momento, pós-desastre, sentem-se os efeitos dos danos intangíveis secundários que se repercutem na saúde da população, decorrentes, por exemplo: de ferimentos; pessoas afetadas por materiais perigosos carregados pelas inundações fluviais; as doenças causadas por veiculação hídrica pelas águas servidas; traumas psicológicos decorrentes das perdas de familiares, dos lares, do emprego que eventualmente refletirá em transtornos mentais e de comportamento (pesadelos e memórias repetidas pós-eventos, fobia, depressão, insônia, etc.) que resultará em problemas de saúde das pessoas.

Quanto aos danos indiretos, estes são sentidos numa escala temporal mais longa do que os diretos. Assim, os danos indiretos tangíveis primários, por exemplo, implicam intervenções na funcionalidade da rede de transportes, o que leva a consequências negativas que causam prejuízos nas atividades de comércio e, conseqüentemente, aos danos indiretos tangíveis secundários com a perda de produção; os danos indiretos intangíveis primários repercutem nas relações humanas num prazo de tempo ainda maior, pós-desastre, em que os

sobreviventes tornam-se mais vulneráveis por ficarem sem condições de saneamento básico, sem abastecimento de água causado pela contaminação da água para consumo humano, sem serviços de coleta e disposição de resíduos sólidos, de moradia, de transportes e de serviços de saúde e até de alimentos, etc.; os danos indiretos intangíveis secundários refletem na relação dos afetados pelo evento perigoso com o território, o que reduz a confiança em conviver no mesmo local e conseqüentemente pode levar ao abandono do lugar.

Naturalmente, quando se utiliza a concepção dos danos desenvolvida por Smith & Ward (1998), há o enquadramento para a análise multi-perigo, ao considerar a integração de diversos fenômenos naturais perigosos, identificando os danos resultantes de cada um deles, mas também os que advêm das sua interação e ação conjunta, que se enquadra nos danos diretos e indiretos (Figura 4.1).

Por exemplo, no caso dos processos associados as inundações fluviais e deslizamentos, ambos são desencadeados por ocorrência de precipitação intensa e abundante e ocorrem ao longo de alguns dias, podendo provocar danos diretos, tangíveis e intangíveis, primários e secundários. Todavia, na sequência destes processos, em determinados contextos, podem ocorrer interações mútuas entre estes perigos: por barramento dos vales, os deslizamentos podem gerar inundações a montante; por erosão lateral, as inundações fluviais podem instabilizar as vertentes pela base, dando origem a novos deslizamentos. Neste último caso, o aporte de material, juntamente com o transporte de sedimentos proveniente da erosão hídrica dos solos, pode, ao longo de meses ou anos, gerar conseqüente acumulação de sedimentos nos canais fluviais e acumulação nas infraestruturas hidráulicas, tal como barragens, promovendo a sua rutura durante a ocorrência de novas cheias, o que gera ocorrência ou amplificação de situações de perigo para jusante e ocasionará os danos diretos e indiretos pela ação do multi-perigo.

Com efeito, esta temática será desenvolvida com maior profundidade no ponto seguinte.

4.2 Metodologia de análise multi-perigo

4.2.1 Integração dos fenômenos potencialmente perigosos

A análise multi-perigo teve como ponto de partida a atuação em corrente dos fenômenos naturais perigosos e as consequências nas infraestruturas. Esta avaliação se deu pela integração dos fenômenos naturais perigosos em simultâneo já caracterizados anteriormente para a bacia hidrográfica do rio Mundaú: erosão hídrica dos solos, deslizamentos, inundações fluviais e suas consequências nas infraestruturas urbanas e tecnológicas e nas populações ribeirinhas (Figura 4.2).

Nesse sentido, as ações de alguns perigos naturais acentuam a ação de outros perigos. Assim, são perigos que causam perdas e danos ao longo da bacia hidrográfica, principalmente, às populações ribeirinhas situadas em leito de inundação fluvial. Nesse sentido, os fenômenos perigosos são avaliados de forma integrada na perspectiva do efeito em cascata.

Com efeito, partindo do processo da erosão hídrica dos solos, fenômeno responsável pela produção de sedimentos na bacia hidrográfica, este não tem impacto imediato sobre as infraestruturas e atividades humanas e, do ponto de vista do risco, são considerados danos intangíveis; deste modo, sua ação advém da interação com outros fatores, nomeadamente com as inundações fluviais. O acarreo de sedimentos das vertentes para os fundos de vale ocasiona, de forma direta, um aumento da carga de sólida nos cursos d'água e, de forma indireta e secundária, decorrente da intensificação e da acumulação de sedimentos nos canais fluviais, nos reservatórios de água. Esta situação, associada a eventos de inundação fluvial, aumenta a energia das vazões ao transportar carga sólida pelo escoamento superficial concentrado ao longo dos cursos d'água.

Para tanto, a deposição de sedimentos nos fundos de vales decorrentes do processo de erosão hídrica dos solos proporciona o assoreamento dos canais de drenagem, o que faz diminuir a capacidade de escoamento dos canais e,

consequentemente, em períodos de vazões elevadas, favorece o extravasamento das águas no leito fluvial. Como também, a acumulação sedimentar nos reservatórios, pode causar a redução do seu volume útil de armazenamento hídrico. Esta situação gera a diminuição das condições de segurança dos reservatórios, havendo perigo de rompimento do reservatório, com a formação de ondas de inundação fluvial com elevada carga sólida, as quais vão atingir as infraestruturas locais, tais como as indústrias, e causar a dispersão de poluentes nos cursos d'água e atingir as populações ribeirinhas.

E, a jusante, a modificação do regime de vazões, podem provocar erosões de leito e das margens do canal fluvial, ou mesmo, grandes escavações que podem evoluir para montante e prejudicar a estrutura das barragens (Carvalho *et al.*, 2000).

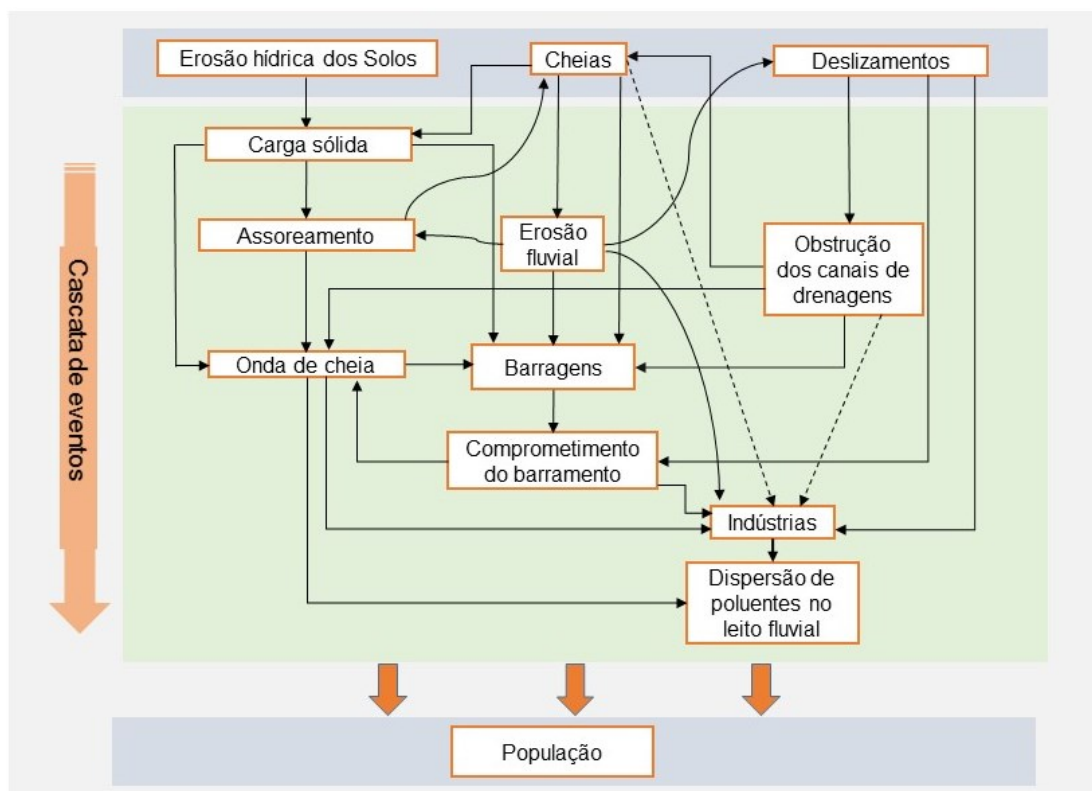


Figura 4.2 – Fluxograma representativo do modelo de análise multi-perigo de fenômenos naturais e tecnológicos.

A ocorrência de deslizamentos também contribui para o transporte de sedimentos nos cursos d'água; além do mais, ao atingirem os fundos de vale encaixados e

formarem barramentos “naturais”, para além de causarem inundações temporárias a montante, o seu provável rompimento forma inundações fluviais a jusante e podem atingir fortemente as infraestruturas locais.

O desencadeamento de um deslizamento a montante e próximo de uma barragem poderá eventualmente formar ondulações fluviais no reservatório, atingir a estrutura do barramento, causar o rompimento da barragem, intensificar a formação da inundações fluvial com carga sólida concentrada e atingir fortemente as demais infraestruturas (reservatórios a jusante, cidades ribeirinhas, indústrias, etc.) a jusante; como também romper a estrutura de outros reservatórios a jusante e intensificar ainda mais a energia de propagação da onda de inundações fluvial com carga sólida para jusante.

A ação desses fenômenos naturais supracitados, em conjunto, ao atingir os elementos expostos, por exemplo, as indústrias, provocam o derrame de material perigoso no leito fluvial e, ao dispersar-se ao longo do rio, atingem as populações ribeirinhas vulneráveis ao multi-perigo e provocam perdas de vidas, danos materiais e ambientais ao longo dos corpos de água.

4.2.2 Variáveis espaciais utilizadas no modelo multi-perigo

Diante dos diferentes perigos no território, utilizou-se as variáveis representativas dos perigos naturais de forma a integrá-las num modelo de suscetibilidade multi-perigo. Assim, teve como base de partida na elaboração do modelo a atuação em conjunto dos fenômenos naturais perigosos (multi-perigo) pela associação dos fenômenos perigosos modelados de erosão hídrica dos solos, de movimentos de vertentes e inundações fluviais, associados à exposição das infraestruturas ao longo dos cursos de água.

Buscou-se dessa maneira, representar a dinâmica dos fenômenos naturais perigosos pela acumulação e transporte de carga sólida pelas variáveis

acumuladas médias: inundação fluvial, erosão hídrica dos solos e as áreas potenciais de movimento massa em vertentes. Essas variáveis foram integradas na perspectiva de efeito em cascata, considerando o transporte de carga sólida acumulada desde as vertentes aos setores de fundo de vales/leito fluvial e ao longo dos cursos d'água e avaliada a exposição das infraestruturas (reservatório/barragens, indústrias e populações ribeirinhas) aos níveis de multi-perigo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

4.2.2.1 Suscetibilidade a erosão hídrica dos solos

O papel da erosão hídrica na modelo de suscetibilidade multi-perigo se dá pela representação do transporte sedimentar e deposição de carga sólida nos cursos de água, nos reservatórios (barragens) e no aumento da energia da inundação fluvial com o incremento devido ao arraste e transporte de carga sólida. A erosão hídrica dos solos é um processo gradual e contínuo e não constitui, só por si, um fenómeno perigoso que cause danos diretos nas infraestruturas e atividades humanas ou na população imediatamente, mas sim, de forma gradual e associado ao escoamento superficial concentrado.

Nesse sentido, foi calculada a acumulação de transporte de sedimentos, que chegam aos cursos d'água, ao longo da bacia hidrográfica. A variável erosão hídrica dos solos, componente da análise multi-perigo, foi obtida a partir da erosão hídrica real. Tendo em conta que parte dos sedimentos erodidos e transportados ao longo das vertentes não chega aos cursos d'água, ficando depositados ao longo do percurso, foi calculado a taxa de transporte de sedimentos – *SDR* (*Sediment Delivery Ratio*), com o intuito de obter o transporte sedimentar ao longo da bacia hidrográfica.

Sendo assim, utilizou-se a equação de *SDR* desenvolvida por Vanoni (1975):

$$SDR = 0,473 \times (0,386Ad)^{-0,125},$$

em que A_d é área de drenagem (km^2).

Posteriormente foram definidas 4 classes (quartis) de intensidade de acumulação sedimentar ao longo dos fundos de vale, a ser utilizadas no modelo de multi-perigo (Figura 4.3-A).

4.2.2.2 Suscetibilidade a deslizamentos de terras

Os deslizamentos integram o modelo de suscetibilidade multi-perigo através de duas ações: pelo impacto potencial direto nos locais onde ocorrem (base de vertente); por contribuírem no transporte e incremento de carga sólida das vertentes para o leito fluvial e eventual formação de barramentos em fundos de vale, com eventual rompimento posterior, que intensifica o escoamento superficial concentrado e os níveis de suscetibilidade multi-perigo na bacia hidrográfica.

Para tanto, inseriu-se no modelo as áreas potenciais de deslizamentos de terras calculadas pelo método estatístico bivariado Valor Informativo (VI); utilizou-se as classes de suscetibilidade a deslizamentos de terras alta a muito elevada com o objetivo de inserir e representar no modelo de suscetibilidade multi-perigo os setores de vertentes mais instáveis e propensos à ocorrência de movimentos de massa em vertentes na bacia hidrográfica.

A suscetibilidade a deslizamentos de terras foi inserida no modelo multi-perigo em 3 níveis de suscetibilidade, definidos: 0 - nula; 1 – elevada 2 - muito elevada; representado pela figura 4.3-B.

4.2.2.3 Suscetibilidade às inundações fluviais

As inundações fluviais são recorrentes na área de estudo e têm ocasionado danos materiais e perdas de vidas, sendo assim um fenômeno perigoso de enorme relevância no modelo de análise multi-perigo. Utilizou-se a suscetibilidade a inundações fluviais, definida pelo modelo desenvolvido por Reis (2011), que em

sua estrutura já tem variáveis médias (*CN* – *Curve Number* médio, área acumulada e declive médio), integradas através de processo iterativo, e cujos resultados foram classificados quanto à intensidade do escoamento concentrado nos setores de drenagem fluvial.

Consequentemente, no modelo multi-perigo são destacadas as classes representativas de maior suscetibilidade a inundações fluviais. Assim, optou-se pelos intervalos de classes de maiores suscetibilidades: moderada, elevada, muito elevada e extremamente elevada nos canais de drenagem fluvial na bacia hidrográfica (Figura 4.3-C).

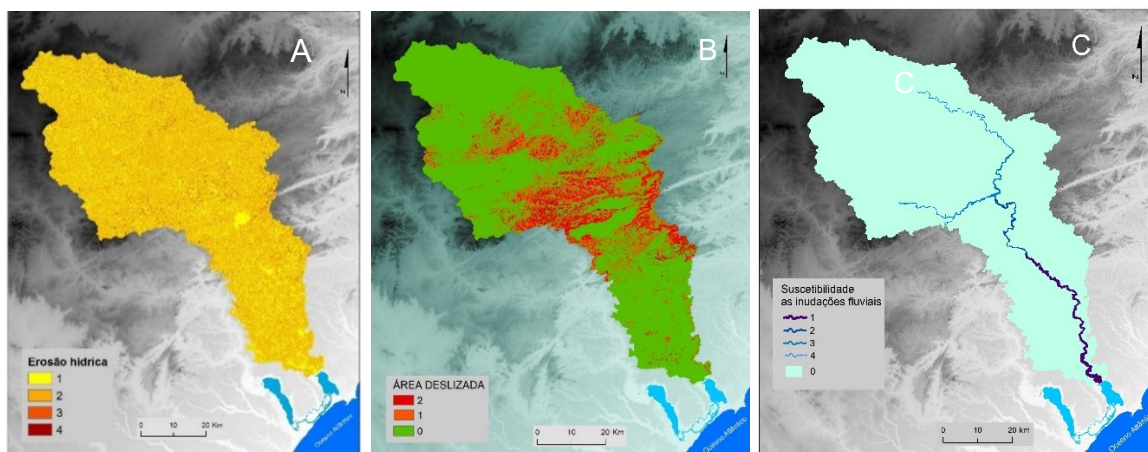


Figura 4.3 – Mapas utilizados na elaboração do Modelo Multi-Perigo, classificados em quartis: erosão hídrica do solo (A); deslizamentos (B); inundações fluviais (C)

4.2.3 Integração das variáveis espaciais no modelo multi-perigo

Com a definição e classificação das variáveis buscou-se a integração dos perigos pelo método de Análise Multi-Critério (AMC). Optou-se pela AMC por ser o método mais adequado de integração das variáveis adimensionais.

No processo de hierarquização das variáveis foi fornecido o maior peso à inundação fluvial, por ser o fenômeno perigoso mais recorrente e com histórico de

casos que causaram danos materiais e perdas de vidas ao longo dos vales da bacia hidrográfica.

Quanto à erosão hídrica dos solos, foi atribuída menos importância que a anterior, mas mais do que aos movimentos de massa em vertentes, pois a bacia hidrográfica apresenta forte predisposição a este fenômeno, associado às condições ambientais que levam ao assoreamento dos rios, devido ao elevado transporte e acumulação sedimentar nos leitos fluviais, que contribui no aumento de energia das inundações fluviais com elevada carga sólida.

Num nível inferior no processo de hierarquização (ponderação) das variáveis, enquadra-se os deslizamentos de terras, por serem deslizamentos superficiais e pequenos, ou mesmos incipientes e, sem forte energia de propagação do material carreado.

Com a definição do ponto de partida de hierarquização dos perigos naturais, realizaram-se os ensaios de ponderação para integração dos 3 fenômenos no processo de elaboração do modelo de multi-perigo na bacia hidrográfica do rio Mundaú (Equação 4.1). Para tanto definiu-se a seguinte relação entre as variáveis:

$$AMP = \sum p_i S_i = p_{ch} \times S_{cheias} + p_{sed} \times S_{sedim} + p_{dz} \times S_{desliz} \quad [4.1]$$

Onde AMP é o resultado na Análise Multi-Perigo, S_{inund} é a suscetibilidade associada à ocorrência de inundações fluviais, S_{sedim} é a suscetibilidade associada à acumulação e transporte de sedimentos provenientes da erosão hídrica do solo, S_{desliz} é a suscetibilidade associada à ocorrência de deslizamentos de terra, e p_i (p_{ch} , p_{sed} , p_{dz}) são as ponderações (grau de importância relativa) fornecidas a cada uma das variáveis espaciais na integração dos fenômenos perigosos.

4.3 Resultados

4.3.1 Metodologia de integração das variáveis para elaboração do Modelo multi-perigo

A elaboração do modelo multi-perigo se deu com a integração das variáveis espaciais por Análise Multi-critério (AMC); buscou-se nos testes de integração/ interação, resultados que representassem a intensidade do multi-perigo desde as vertentes suscetíveis a deslizamentos sob ação combinada das cheias e de carga sólida na base das vertentes e a acumulação de transporte sedimentar nos canais de drenagens fluviais suscetíveis a inundações fluviais.

Os valores de amplitude (h_i) dos resultados apresentados são intervalos de classes de perigos naturais, representativos das maiores intensidades dos resultados alcançados no processo de interação dos perigos naturais apresentados no histograma de frequência.

Quadro 4.1 – Resultados dos testes de integração das variáveis, para diversas ponderações dos fatores, do modelo de avaliação multi-perigo por Análise Multi-Critério (AMC).

Teste de integração	Ponderações			Amplitude de resultados ($I_i - L_i$)
	Cheias	Sedim	Desliz	
1	0,50	0,30	0,20	3,2 - 0,3
2	0,50	0,25	0,30	2,8 - 0,25
3	0,55	0,25	0,20	3,2 - 0,25
4	0,55	0,20	0,25	3 - 0,2
5	0,60	0,20	0,20	3,2 - 0,2
6	0,60	0,25	0,15	3,4 - 0,25
7	0,60	0,15	0,25	3 - 0,15
8	0,65	0,20	0,15	3,4 - 0,2
9	0,65	0,15	0,20	3,2 - 0,15
10	0,70	0,20	0,10	3,6 - 0,2
11	0,70	0,10	0,20	3,2 - 0,1
12	0,75	0,15	0,10	3,6 - 0,15
13	0,75	0,10	0,15	3,4 - 0,1
14	0,8	0,1	0,1	3,6 - 0,1
15	0,8	0,15	0,05	3,8 - 0,15
16	0,8	0,05	0,15	3,4 - 0,05

Inund = modelo de inundações fluviais; Sedim = *modelo de erosão*; Desliz = *modelo de deslizamentos*.

Se observa que, com aumento na ponderação da variável inundação fluvial, há tendência para aumento da amplitude dos intervalos de classes e, de maneira geral, as máximas amplitudes dos resultados dos testes de interação deram-se com a maior ponderação para inundação fluvial, em segundo lugar de hierarquização das variáveis o transporte de sedimentos (erosão dos solos) e, em terceiro, os deslizamentos de terra, ou quando iguados as ponderações destas duas últimas. As maiores amplitudes foram alcançadas quando o nível de hierarquização foi maior para os deslizamentos de terras e menor para o transporte de sedimentos (Quadro 4.1 e Figura 4.4).

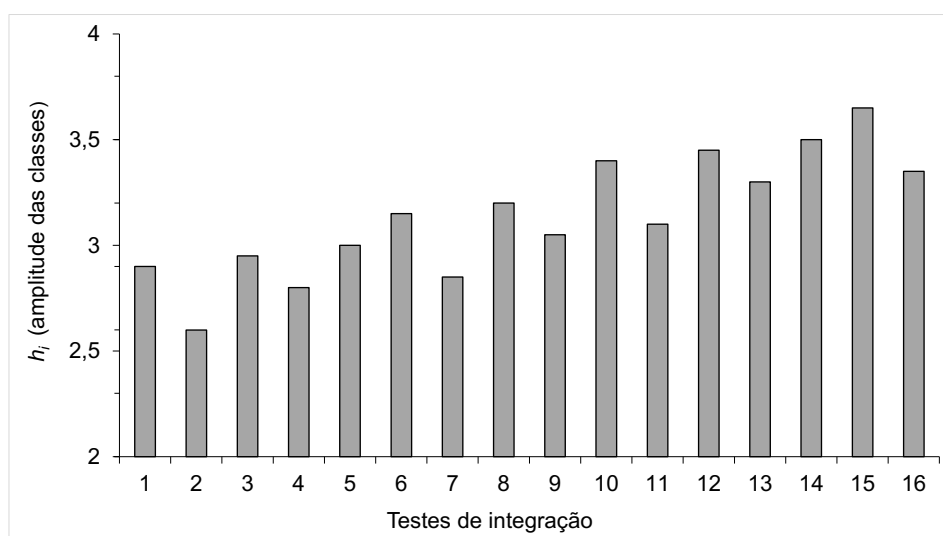


Figura 4.4 – Amplitude dos intervalos de classes (h_i) com aumento da ponderação do fator inundações fluviais, e linha de tendência de resultados dos testes de integração/interação do modelo multi-perigo.

Os resultados dos ensaios de construção do modelo multi-perigo (testes de integração 1 a 5) por interação das variáveis através de análise multicritério, apresentaram áreas de perigo a movimento de vertentes reduzidas; o transporte sedimentar e de inundações fluviais mostraram fraca acumulação do escoamento concentrado ao longo das drenagens fluviais.

O aumento da ponderação da variável inundações fluviais (S_{cheias}) se repercute, como mencionado, no aumento da amplitude dos resultados associado a acumulação sedimentar e deslizamentos, respectivamente. Assim, observou-se a

intensificação do nível multi-perigo nas vertentes instáveis combinado ao transporte de sedimentos no teste de interação 6 (Quadro 4.1).

As representações no modelo foram significativas nos testes de integração de maiores amplitudes do 7 ao 13, os quais mostraram maiores intervalos de classes e coerência na representatividade espacial do multi-perigo sem grandes diferenças significativas dos valores de amplitudes dos intervalos de classes (h_i) (Quadro 4.1).

Assim, o teste de integração do multi-perigo 16 por foi escolhido, apresentar coerência na distribuição espacial do multi-perigo no território (Quadro 4.1), mais adequada à representatividade espacial dos níveis de multi-perigo classificados por intervalos definidos por quebras naturais (*natural break*) representativos dos 5 níveis de intensidade do multi-perigo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Para além do 16º teste de integração houve limitação dos resultados com apenas a representação do transporte de carga sólida (inundações fluviais e transporte sedimentar).

Os resultados da interação/integração dos perigos nos 5 níveis de intensidade multi-perigo são:

- i) nível 1: compreendem os deslizamentos de terras, carreamento de sedimentos das vertentes;
- ii) níveis 2, 3, 4 e 5: escoamento superficial concentrado (inundações fluviais, carga sólida e erosão de base das vertentes) ao longo do talvegue nos níveis multi-perígo (2 e 3).

Os níveis de multi-perigo 1, 2 e 3 foram coerentes com a hierarquia fluvial e densidade de drenagem em vertentes dissecadas. A exemplo, o setor de elevada suscetibilidade multi-perigo se justifica por receber a acumulação do escoamento concentrado oriundo de montante do rio Canhoto e de suas sub-bacias de drenagem fluvial (Figura 4.5).

E no setor inferior da bacia hidrográfica, estão os níveis multi-perigo 4 e 5 essencialmente de maior acumulação do escoamento superficial concentrado,

com carga sólida (inundação fluvial e transporte de sedimentos) predominantemente no rio Mundaú.

O nível multi-perigo 4 recebe de montante a acumulação de carga sólida das drenagens dos rios Canhoto e Mundauzinho e dos afluentes do rio Mundaú que resultam no multi-perigo muito elevado; a jusante a acumulação gradual e ainda mais concentrada provenientes das subbacias no setor intermédio do rio Mundaú estabelecem o nível máximo de multi-perigo (5) extremamente elevado (Figura 4.5).

O resultado final do modelo multi-perigo possibilitou identificar os setores perigosos e a atuação integrada dos fenômenos perigosos na perspectiva do efeito em cascata na bacia hidrográfica (Quadro 4.2 e Figura 4.5).

Assim, mediante os resultados dos ensaios de modelação buscou-se a classificação do modelo multi-perigo por métodos estatísticos que melhor definisse os intervalos de classes que representassem os diferentes níveis de perigo, desde montante a jusante e das vertentes aos fundos dos vales.

Quadro 4.2 – Caracterização da representação espacial do modelo multi-perigo.

NMP	Intensidade	Multi-perigo
1	Baixa e muito baixa	Deslizamentos de terras, transporte sedimentar e inundações fluviais
2	Moderada	
3	Elevada	Cheias e carga sólida
4	Muito Elevada	
5	Extremamente elevada	

NMP-Níveis Multi-Perigo.

Sendo assim, realizaram-se testes de classificação por desvio padrão e quantis; no entanto, a classe de perigosidade mais elevada se concentrou em grande parte da rede de drenagem fluvial e não houve subdivisões de classes multi-perigo na bacia hidrográfica e cursos d'água.

Com efeito, os resultados finais mais representativos espacialmente no modelo foram os definidos por classes com intervalos por quebras naturais (Quadro 4.2 e Figura 4.5).

Dessa maneira, o modelo mostrou 318,5 km² da área de estudo com elevado perigo de deslizamentos associado ao forte carreamento de sedimentos nas vertentes (nível multi-perigo1); as áreas inundáveis e de transporte sedimentar nos fundos de vale corresponderam: i) a 12,6 km² no nível multi-perigo 2, de intensidade moderada; ii) a 3,4 km² ao nível multi-perigo 3, de elevada intensidade; nos setores central e jusante as áreas inundáveis com elevada e extremamente elevada acumulação e transporte sedimentar corresponderam a 13 km² (nível multi-perigo 4) e 29,4 km² (nível multi-perigo 5), respectivamente.

O que se observa a partir do modelo multi-perigo, que a ação conjunta dos perigos se intensifica ao longo da bacia hidrográfica, onde a forte produção de sedimentos associada às condições ambientais, proporcionam a acumulação e transporte sedimentar ao longo dos canais fluviais. Sendo assim, ocasiona o assoreamento dos rios e reduz a capacidade de condução do fluxo fluvial e, com ocorrência de inundações fluviais, há forte transporte sedimentar e movimentos de massa nas vertentes, que incrementam o acúmulo de massa sólida ao longo dos cursos d'água de montante para a jusante. Concomitantemente, as infraestruturas das barragens de terra, devido à fragilidade dos barramentos de terras, ao romperem fazem elevar o multi-perigo ao longo dos cursos de água.

O que se observa que os deslizamentos de terras são pequenos (incipientes) e a área do reservatório é, certamente, muito maior do que a massa deslizada; assim não há perigo de forma ondulações no reservatório com a ocorrência de deslizamento de terras e, também, os deslizamento de terras não alcançam os fundos de vales e não tem massa suficiente para formam barramentos nos cursos d'água.

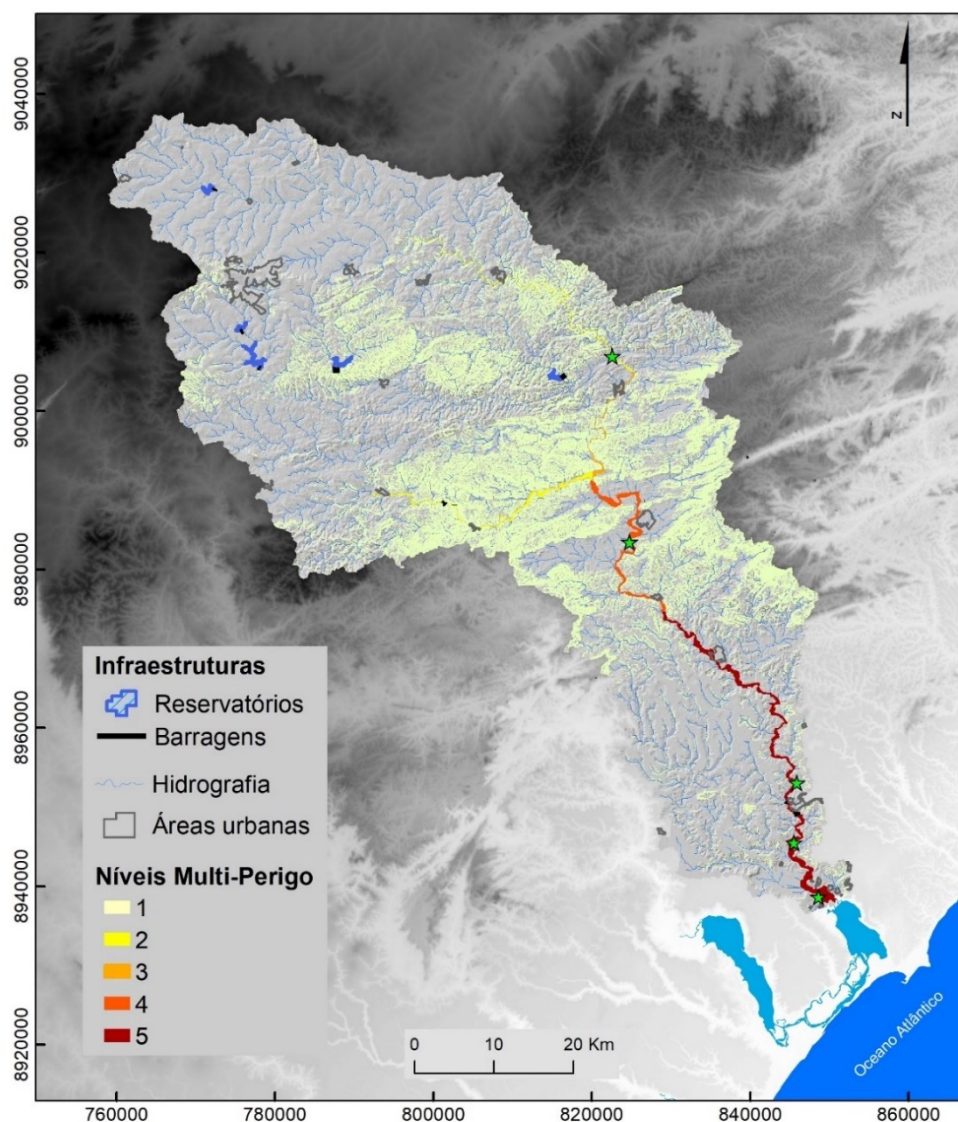


Figura 4.5 – Cartografia multi-perigo de fenômenos naturais e tecnológicos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

4.4 Exposição das infraestruturas ao multi-perigo

A partir do modelo multi-perigo é possível descrever a exposição das infraestruturas: reservatórios/barragens, indústrias e áreas urbanas. No que se refere aos reservatórios, estão situados no setor montante da bacia hidrográfica, onde os solos são mais suscetíveis à erosão hídrica associada às intempéries

locais, que favorece o transporte sedimentar ao longo das vertentes e dos cursos d'água, em direção às barragens.

Os reservatórios/barramentos situados no setore montante (barragens Cajarana, Mundaú e Mundaú II (Cajueiro) estão expostos a acumulação sedimentar. No entanto, estão situadas em setores que não oferecem perigos de inundações fluviais e de deslizamentos de terras; mas as barragens Inhumas e Espeto estão situadas em setores de nível multi-perigo (1) de deslizamentos e transporte de sedimentos proveniente de seu entorno havendo o perigo de incremento de carga sólida e acumulação nos reservatórios (Figura 4.5).

No tocante às indústrias, estão situadas nos setores de drenagem fluvial mais perigosos com ní/veis de multi-perigo (2 a 5) moderado a extremamente elevado (Figuras 4.6 e Figura 4.7):

- i) Usina Serra Grande está situada na margem direita do rio Canhotinho num setor de moderada intensidade dos perigos de inundações fluviais e de transporte sedimentar;
- ii) Usina Laginha, exposta ao nível multi-perigo muito elevado (4) de cheias e de carga sólida;
- ii) Usinas Santa Clotilde e Urtiga Leão no setor inferior da bacia hidrográfica onde o nível multi-perigo é extremamente elevado (5);
- v) fábrica de fertilizantes Tmac situada próximo da foz, na margem direita, acima da planície fluvial, sem registro de ter sido atingido por inundações fluviais.

Portanto, as indústrias de produção de açúcar e álcool, a serem atingidas pelas ondas de inundações fluviais e de carga sólida oferecem perigos às infraestruturas e aos trabalhadores locais, mas não oferecem perigo para as populações ribeirinhas quanto à dispersão de produtos químicos liberados ou derramados ao longo do rio.

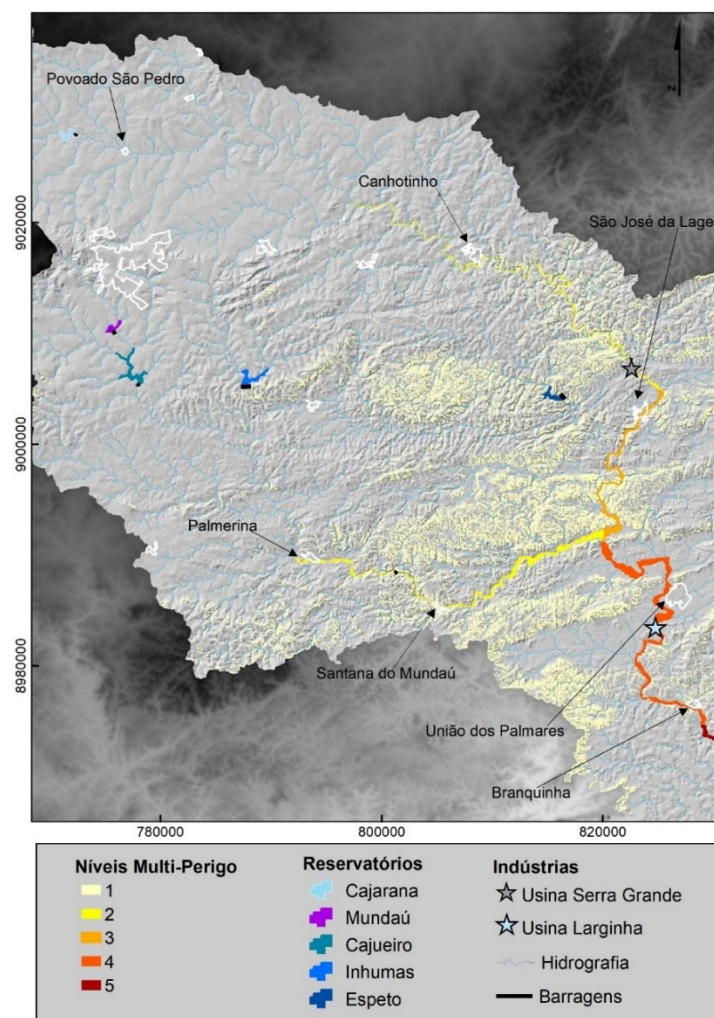


Figura 4.6 – Localização dos reservatórios barragens e os níveis multi-perigo no setor de montante da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

No que se refere às áreas urbanas, estão expostas ao multi-perigo de inundações fluviais e de transporte sedimentar, nomeadamente as cidades ribeirinhas situadas parcialmente em leito de inundação fluvial: Correntes, Santana do Mundaú e Canhotinho, em nível multi-perigo moderado (2); São José da Lage, situada num setor de multi-perigo elevado (3); União dos Palmares e Branquinha, nos setores de nível multi-perigo muito elevado (4); Murici e Rio Largo, localizadas em nível multi-perigo extremamente elevado (Figuras 4.6 e 4.7).

Nesse contexto, a montante, o fenómeno de erosão hídrica dos solos, associado a inundação fluvial, intensifica o transporte de carga sólida que se concentra no rio

Canhoto com o nível de suscetibilidade multi-perigo moderado (2), onde estão expostas ao multi-perigo a cidade ribeirinha Canhotinho e a indústria de produção de açúcar e álcool Usina Serra Grande.

Consequentemente, o escoamento superficial concentrado e de sedimentos para jusante se eleva e torna a área urbana de São José da Laje exposta ao multi-perigo elevado (3). O nível multi-perigo elevado tem potencial para erodir as margens fluviais e intensificar o transporte de carga sedimentar ao longo da drenagem fluvial, nomeadamente, para o rio Mundaú.

Ainda mais, situado num afluente do rio Canhoto, o reservatório/barragem Inhumas torna-se segura pela sua estrutura de concreto e o nível multi-perigo 1 se apresenta a jusante do reservatório; noutro afluente do rio Canhoto está o reservatório/barragem Espeto com o barramento de terra, no setor central da bacia hidrográfica, entre vertentes com predisposição a deslizamentos e acumulação de carga sólida.

Consequentemente, o transporte de carga sólida para jusante no rio Canhoto intensificaria o multi-perigo ao longo do rio Mundaú num eventual rompimento dessa barragem de terra, e atingiria fortemente as áreas urbanas e indústrias em leito de inundação fluvial com níveis de multi-perigo 4 e 5 (Figura 4.7).

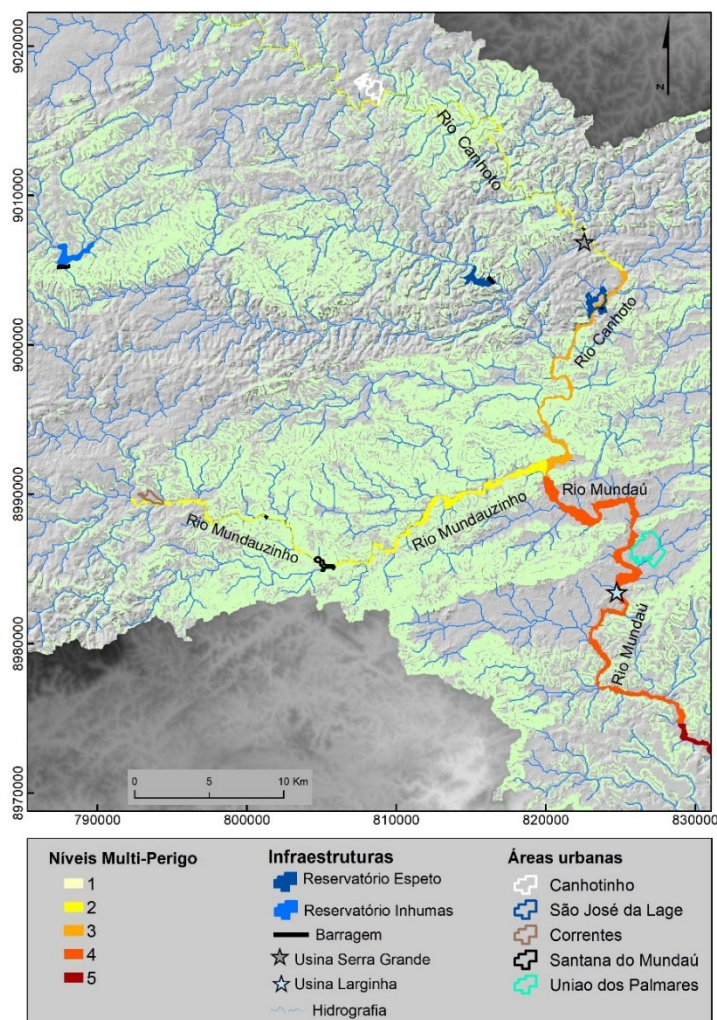


Figura 4.7 – Multi-perigo e as infraestruturas situadas no setor intermédio da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Com a interpretação do modelo multi-perigo, constatou-se a exposição das cidades ribeirinhas - Correntes e Santana do Mundaú - no trecho do rio Mundaúzinho (braço direito de drenagem fluvial) de suscetibilidade multi-perigo moderado (2). Neste setor, existe ainda o perigo de ocorrência de movimentos de massa em vertentes e a ação moderada das inundações fluviais e de transporte sedimentar aumentam o escoamento superficial concentrado (carga sólida) para jusante (Figura 4.7).

Com efeito, no setor intermédio, a acumulação do escoamento superficial e de transporte de carga sólida provindo das drenagens de montante dos rios Canhoto

e Mundaúzinho, eleva o nível multi-perigo no setor de drenagem do rio Mundaú. São esses os setores de maior acumulação do escoamento superficial e sedimentar concentrados. Mais ainda, em ambos os setores multi-perigo (4 e 5) o transporte de carga sólida no leito fluvial recebe acréscimo resultante da erosão lateral das margens do rio Mundaú pela forte energia de propagação de carga sólida de montante.

A propagação do escoamento concentrado (inundação fluvial e carga sedimentar) no rio Mundaú, faz elevar o nível de suscetibilidade ao nível multi-perigo muito elevado (4), onde estão expostas e serão atingidas fortemente as infraestruturas: área urbana de União dos Palmares, Usina Larginha e a cidade de Branquinha (Figuras 4.7 e 4.8).

E, no setor mais inferior, a intensificação do fluxo do escoamento concentrado e o afluxo concentrado de carga sólida no rio Mundaú torna-se o setor de nível multi-perigo extremamente elevado (5), onde podem ser atingidas, em planície fluvial, as áreas urbanas: Murici, Rio Largo e as Usinas Santa Clotilde e Leão (Figura 4.8). E soma-se, nesse setor, o incremento de carga sólida proveniente das vertentes de nível multi-perigo 1.

A propagação da elevada carga sólida proveniente de montante (setor de nível multi-perigo 1 e 3) intensifica o multi-perigo, nesse setor, com o eventual rompimento do reservatório Espeto, fornecendo mais energia à propagação de carga sólida ao longo do rio Mundaú (Figuras 4.7 e 4.8).

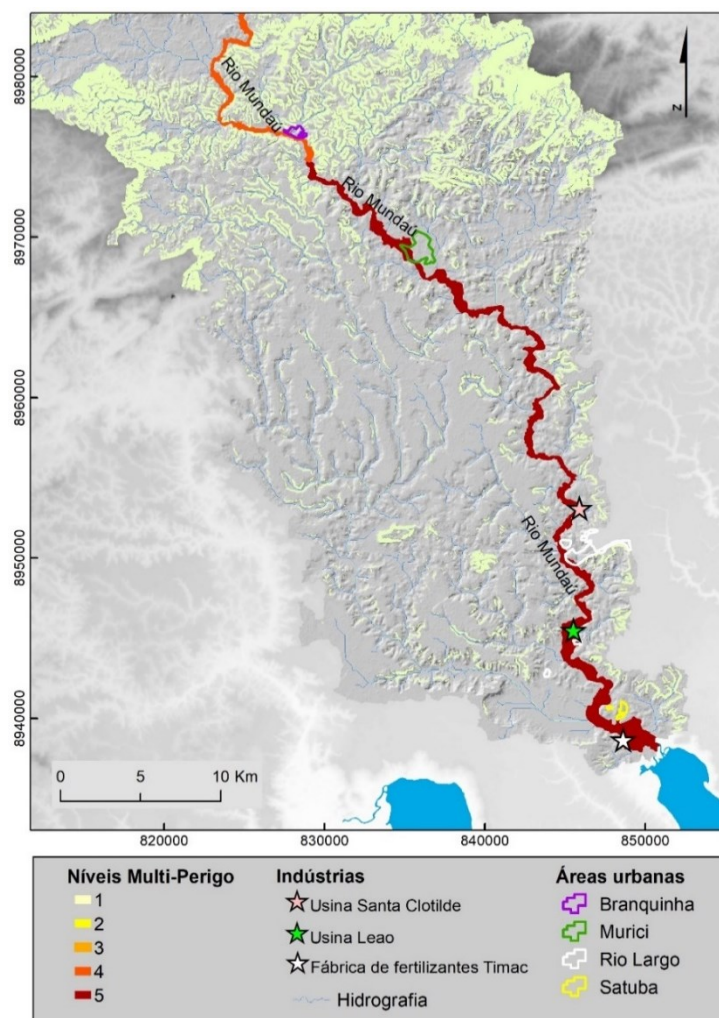


Figura 4.8 – Multi-perigo no setor inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Os níveis de multi-perigo são maiores justamente onde estão situadas as cidades ribeirinhas que possuem elevados índices de pobreza, que, assim, as tornam mais vulneráveis ao multi-perigo; os municípios não possuem recursos financeiros próprios suficientes de recuperação dos danos materiais pós-desastres, para dar assistência à população local. Dessa forma, os municípios precisam recorrer a ajuda do governo estadual, e quando a situação é mais grave recorre a ajuda humanitária decorrente de recursos financeiros fornecidos pelo governo federal do Brasil para eventuais recuperação pós-desastres na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

4.4 Conclusão da análise multi-perigo

A partir da análise integrada do multi-perigo é possível identificar que as condições ambientais e físicas da bacia hidrográfica contribuem na intensificação dos níveis de multi-perigo:

- i) a erosão hídrica dos solos com a produção, acarreamento, transporte e deposição de sedimentos ao longo dos canais fluviais;
- ii) o assoreamento dos canais de drenagem diminui a capacidade de drenagem do leito fluvial e favorecem a ocorrências de cheias;
- iii) florestas substituídas por pasto, culturas agrícolas e solo exposto em setores de vertentes favorecem a ocorrência de deslizamentos superficiais e, conseqüentemente, o acarreamento de sedimentos e transporte de massa para as drenagens fluviais.
- iv) Condições climáticas com fortes precipitações distribuídas na bacia hidrográfica associado aos a forma da bacia, o relevo, declives acentuados, e solos rasos.

As condições ambientais e naturais da área de estudo apresentam predisposição à ocorrência dos fenômenos perigosos, com acentuados declives no setor intermédio e solos rasos desde montante ao setor intermédio, e as condições do uso do solo, com predomínio do uso agrícola e pasto, áreas de solo exposto e apenas fragmentos de florestas. São condições do terreno que contribuem para intensificação do multi-perigo: deslizamentos de terras, forte produção de sedimentos inundações fluviais e, conseqüentemente a propagação e transporte de carga sólida ao longo das drenagens fluviais.

Dessa maneira, os processos são intensificados e os perigos se acumulam na perspectiva do efeito em cascata com mais intensidade desde o setor intermédio ao setor jusante, de níveis multi-perigo elevado a extremamente elevado.

A ação do multi-perigo nas áreas urbanas e industriais é intensa por estarem situadas em leito de inundação fluvial, nas margens dos rios, em planície fluvial que tornam-se expostas à ação do multi-perigo sob consequências de danos diretos tangíveis e primários.

As populações ribeirinhas ao serem atingidas pela elevada carga sólida, tornam-se mais vulneráveis ao multi-perigo, por terem elevado índice de pobreza, essencialmente as populações residentes nas áreas ribeirinhas de Correntes, no estado de Pernambuco, e de São José da Laje, União dos Palmares, Branquinha, Murici e Rio Largo, no estado de Alagoas sofrem os danos indiretos intangíveis primários.

Os setores de níveis multi-perigo muito elevado a extremamente elevado, no rio Mundaú, são setores onde estão situadas as cidades ribeirinhas com as maiores densidades populacionais, maiores índices de pobreza e menor Índice de Desenvolvimento Urbano (IDH). Estas condições socioeconômicas dos municípios intensificam os danos (indiretos intangíveis primários) e aumentam a vulnerabilidade e tornam mais difícil a recuperação dos danos (diretos tangíveis e secundários) após a ação do evento perigoso, pois, em grande parte, não há sobras significativas das receitas em relação às despesas dos municípios, os valores de receitas e despesas são equivalentes.

Portanto, este trabalho elaborou de forma sistemática o modelo multi-perigo, onde é possível analisar a inter-relação entre os perigos naturais na perspectiva do efeito em cascata e identificar os setores com diferentes níveis multi-perigo no território. a atuação em corrente e um perigo atenuando a ação do outro.

A integração dos perigos representa de forma mais fiel a intensidade dos fenômenos naturais perigosos de maneira dinâmica e sistemática no território. Além disso, o modelo multi-perigo pode ser o mecanismo de prevenção de perdas, redução dos riscos, da exposição e da vulnerabilidade na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

5. CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho é relevante pela nova abordagem de avaliação dos perigos naturais de forma integrada (multi-perigo) na perspectiva em cascata ou dominó numa relação de causa e efeito, visto que ainda são poucos os estudos de avaliação dos múltiplos perigos que consideram a integração dinâmica do fenômeno perigosos, através do efeito em cascata

Esta análise é realizada a partir da criação de uma base de dados geográficos, um inventário de deslizamentos de terras, levantamento das ocorrências e de marcas de inundações fluvias e das condições físicas (geomorfologia, litologia, solos, uso do solo, clima, etc.) e antrópicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú, que assim se chegou na avaliação dos múltiplos perigos pela suscetibilidade, a erosão hídrica do solos, deslizamentos de terras e inundações fluviais analisados de forma integrada por um modelo de análise multi-perigo (MP) em 5 níveis de intensidade multi-perigo.

Essa análise multi-perigo em cascata é realizada a escala regional de uma bacia hidrográfica do rio Mundaú e analisado a forma como os fenômenos perigosos (transporte de sedimentos, deslizamentos de terras e inundações fluviais) se interagem no território e, conseqüentemente, o efeito dessa interação nos elementos expostos, as infraestruturas (barragens, cidades ribeirinhas e indústrias) na bacia hidrográfica do rio Mundaú; pelo que esse estudo se torna uma peça base para tomar medidas de precaução com a indicação da vulnerabilidade no território, medidas de prevenção das perdas de vidas e danos materiais e de mitigação dos riscos, na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

O que se observa é a associação dos múltiplos perigos com as condições físicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú, no setor intermédio há forte potencial a propagação do escoamento superficial, transporte de sedimentos e deslizamentos de terras, nos domínios de chapadas e platôs, morros e de serras baixas onde

predominam o relevo fortemente ondulado a montanhoso com vertentes e drenagens fluvias de maiores declives em rochas cristalinas e solos rasos e de clima mais seco, é um setor de forte contribuição do escoamento concentrado (carga sólida) para a metade inferior da bacia hidrográfica.

É a partir desse setor, a metade inferior da bacia hidrográfica que acumulação é mais intensa com volumes de vazões e níveis multi-perigo mais elevados, num ambiente de colinas, rebordo erosivos e planícies aluvias desenvolvidas; as drenagens fluviais possuem menores declives; a litologia é de rochas sedimentares e os solos são mais espessos no setor mais húmido da bacia hidrográfica.

Além das condições físicas da bacia hidrográfica, as ações antrópicas com a substituição de florestas por culturas agrícolas e pasto mais as áreas de solos exposto intensificam a produção de sedimentos, desasbilização das vertentes e intensificam o escoamento concentrado na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Com efeito, a degradação dos solos e, conseqüentemente, a elevada produção de sedimentos, e o carreamento de massa dos solos das vertentes para as drenagens fluviais, potencializam o transporte de carga sólida concentradas nos cursos d'água e gera o pontencial destrutivos das inundações fluviais, pelo que têm causados danos materiais e perdas de vidas, a exemplo, os eventos de inundações fluviais nos anos: 1914, 1941, 1969, 1957, 1988, 1989, 2000 e 2010; que a partir desse histórico de inundações fluviais, de modo geral, se observar, que a recorrência das inundações fluviais na bacia hidrográfica do rio mundaú é de 10 anos

Para além dos fatores físicos e humanos mencionados, as barragens com estruturas de terras situadas na metade superior da bacia hidrográfica é mais u fator de perigo (tecnológico) de rompimento dessas barragens de terras, que ao romper-se intensifica ainda mais a propagação do escoamento concentrado na bacia hidrográfica.

Dessa forma, há necessidades de monitoramento dessas estruturas (barragens), e ações de controle de construção destas para mitigar o perigo de um eventual rompimento dessas infraestruturas e causar inundações fluviais de potencial destruidor para jusante e atingir fortemente os elementos expostos, parte das cidades e indústrias situadas em leito de inundação fluvial.

De acordo com a integração dos perigos de erosão dos solos, deslizamento de terras e inundações fluvias analisados de forma integrada e dinâmica na perspectiva do efeito em cascata são identificados os níveis de multi-perigo que se intensificam de montante para jusante com forte energia de propagação de carga sólida na bacia hidrográfica.

Se constata também, que os níveis de multi-perigo são intensificados pelas ações antrópicas devido as alterações do uso do solo, principalmente com a substituição das florestas por áreas agrícolas, pasto e solo exposto, que potencializam escoamento concentrado, sobretudo as inundações fluviais com o incremento de carga sólida.

Assim, de acordo com análise dinâmica do multi-perigo, se constata a elevada vulnerabilidade das populações ribeirinhas e infraestruturas (indústrias) locais exposta ao multi-perigo na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Nesse contexto, diante dos perigos existentes na bacia hidrográfica, deve haver esforços com intuito de minimizá-los, assim, são necessárias medidas e políticas voltadas para restauração ambiental que contribuam para minimizar os impactos ambientais, decorrente dos fenômenos perigosos da erosão hídrica dos solos associado ao assoreamento dos cursos d'água com medidas de recomposição florestal, principalmente, nas vertentes, nas margens dos rios e nas nascentes.

Continuidade no monitoramento hidrometeorológicos e de previsão de chuvas e de inundações fluviais pelo sistema de alerta precoce, são estas algumas ações do ponto de vista físico que podem minimizar as perdas de vidas e danos materiais decorrentes do multi-perigo em cascata na bacia hidrográfica do rio Mundaú. E

também a incorporação do monitoramento do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica e vistorias das barragens a verificar a integridade dos barramentos de terras, principalmente.

Além disso, ações e implantação de programas de educação ambiental de coleta e de gerenciamento de resíduos sólidos e de limpeza de entulhos (galhos de árvores, material de descartes, etc.) com o objetivo de evitar o acúmulo nos rios, e evitar a obstrução e formação de barramentos no sistema de drenagem fluvial, em trechos de pontes, em galeria de drenagem de águas pluviais, nas seções dos rios que possam intensificar ou agravar a ação do multi-perigo em cascata. Como também deve haver controle nos projetos de obras de infraestruturas hidráulicas que não causem o estrangulamento dos sistemas drenagens hidráulica e fluvial.

Estas ações devem estar ligadas as práticas agrícolas que proporcionem a conservação dos solos assim como medidas de saneamento ambiental com o tratamento de efluentes

E, no contexto social, são necessárias medidas de ordenamento do território a evitar a ocupação residencial nas áreas perigosas a fim de diminuir a exposição das pessoas aos níveis de multi-perigo, assim como ter atenção especial na localização de hospitais, sede de corpo de bombeiro, escolas, no sentido de mantê-las fora das áreas de riscos.

Ainda assim, são importantes trabalhos de conscientização dos riscos para as populações locais, como também a elaboração de planos de evacuação local e de emergências nas esferas municipais e ou estaduais de acordo com a análise multi-perigo na área de estudo.

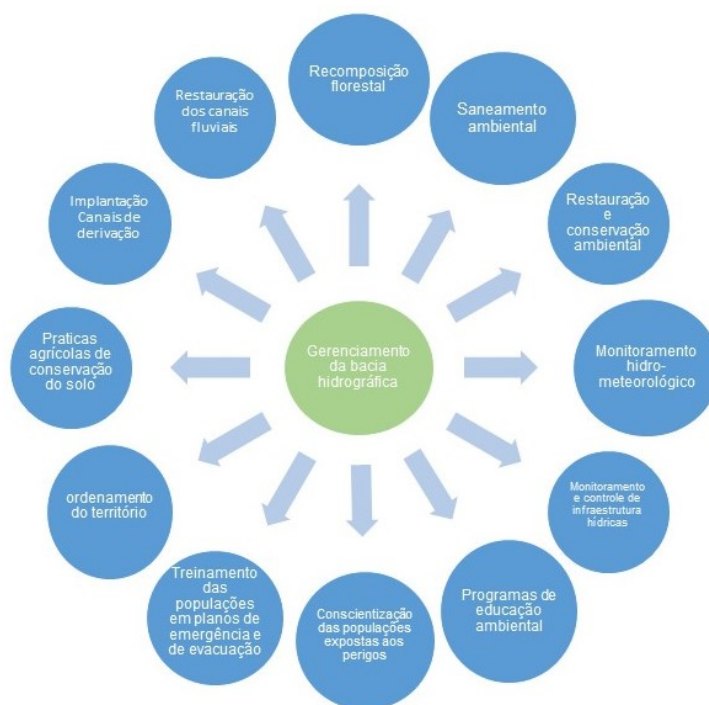


Figura 4.9 – Representação das medidas e ações para o gerenciamento da bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Portanto, este estudo pode servir como instrumento para subsidiar programas de gerenciamento ambiental e de multi-risco e dar subsídios a novas políticas públicas de ordenamento do território, como também fornecer conhecimento para tomadas de decisões dos órgãos gestores da bacia hidrográfica do rio Mundaú. Onde merece destacar a implantação das medidas e ações de gerenciamento e mitigação dos impactos ambientais e do multi-perigo naturais para evitar ou minimizar as perdas de vidas e danos materiais na bacia hidrográfica do rio Mundaú (Figura 4.9).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, L. Q. (2012). *Riscos ambientais e vulnerabilidades nas cidades brasileiras: conceitos, metodologias e aplicações*. Coleção PROPG Digital (UNESP), 215p.

Almeida, L. Q., Welle, T., Birkmann, J. (2016). Disaster risk indicators in Brazil: A proposal based on the world risk index. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 17, pp. 251-272.

Andrade, M. A., Procópio, M. M. M (1989). Decreto número 33 523 de julho de 1989. *Estado de calamidade pública nos municípios do estado de Alagoas*. Estado de Alagoas, Gabinete do Governador.

Antoneli, V., Thomaz, E.L. (2007). Caracterização do meio físico da bacia do Arroio Boa Vista, Guamiranga-PR. *Caminhos da Geografia*, 21(8), pp.46-58.

Appelquist, L. R., Halsnæs, K. (2015). The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate. *Journal of Coastal Conservation*, 19(2), pp. 157-179.

Araújo Filho, J. et al. (2000). *Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco*. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 378 p.

Assad, E.D. (1994). *Chuva nos cerrados: análise e espacialização* Embrapa - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária, Brasília, 423p.

Assis, S. J., Alves, A. L., Nascimento, M. C. (2007). *Atlas escolar Alagoas: espaço geo-histórico e cultural*, 208 p.

Aye, Z. C. et al. (2016). An interactive web-GIS tool for risk analysis: A case study in the Fella River basin, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(1), pp. 85–101.

Baecher, G., Christian, J. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-49833-9, 618p.

Barbosa, L.M. (1985). *Quaternário costeiro do estado de Alagoas: Influências das variações do nível do mar*. Dissertação de mestrado em geologia, UFBA, 58p.

Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42(1), pp. 125-148.

Barros, A. H. C., Filho. J. C. de A., Silva. A. B., Santiago G. A. C.(2012). Climatologia do estado de Alagoas. *Boletim de pesquisa e Desenvolvimento*, ISSN 1678-0892.

Barros, J. L. A. A. (2010). *Riscos Naturais e Tecnológicos com expressão no concelho de Lamengo. Contributo para o Ordenamento e Gestão de Emergência Municipal*. Dissertação de Mestrado em Dinâmicas Sociais, Riscos Naturais e Tecnológicos, 101p.

Barua, U., Akhter, M. S., Ansary, M. A. (2016). District - wise multi-hazard zoning of Bangladesh. *Natural Hazards*, 82(3), pp. 1895-1918.

Bell, R., Glade, T. (2004). *Multi-hazard analysis in natural risk assessments*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 77.10p.

Beltrão, B, A. et al. (2005). *Diagnóstico do município de União dos Palmares*. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Pernambuco. CPRM/PRODEEM.12p.

Boukalova, Z (2005). *Applied multi Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assessment*, ARMONIA Project.

Bovolo, C. I., Abele, S. J., Bathurst, J. C., Caballero, D., Ciglan, M., Eftichidis, G., Simo, B. (2009). A distributed framework for multi-risk assessment of natural hazards used to model the effects of forest fire on hydrology and sediment yield. *Computers & Geosciences*, 35(5), pp. 924-945.

Brooks, N. (2003). *Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework*. Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper38.

Budimir, M. E. A., Atkinson, P. M., Lewis, H. G. (2014). Earthquake-and-landslide events are associated with more fatalities than earthquakes alone. *Natural hazards*, 72(2), pp. 895-914.

Burton, I., Kates, R., White, G. (1993). *The Environment as Hazard*. 2nd Ed, the Guilford Press, New York/London. ISBN 0-203-98986-4.

Cai, F. et al. (2009). Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Progress in Natural Science*, 19, pp.415 - 426.

Carvalho, N. O (1994). *Hidrossedimentologia Prática*. 1. ed. Rio de Janeiro: CPRM/Eletróbrás, 325 p.

Carvalho, N. O. (2008). Hidrossedimentologia prática. *Interciência*, Rio de Janeiro: 2 ed, 600p.

Carvalho, N., Filizola Júnior, N., Santos, P., Lima, J. (2000). Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. *Agência Nacional de Energial Elétrica – ANEEL*, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, Brasília.

Chaves, H. M. L., Piau, L. P. (2008). Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do distrito federal. *Revista brasileira de ciências do solo*, (32), pp. 333-343.

Chen, H. X., Zhang, S., Peng, M., Zhang, L. M. (2016). A physically-based multi-hazard risk assessment platform for regional rainfall-induced slope failures and debris flows. *Engineering Geology*, 203 (25), pp. 15-29.

Choine, M.N. *et al* (2015). A multi hazard risk assessment methodology accounting for cascading hazard events. *12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, 8p.

Christofoletti, A. (1969). *Análise morfométrica de bacias hidrográficas*. Geomorfologia, Campinas, 9(18), pp.35-64.

Clarke, J., O'Brien, E. (2016). A multi-hazard risk assessment methodology, stress test framework and decision support tool for resilient critical infrastructure. *Transport Research Arena*(6), p. 1–10.

Cohen, J. C. P., Silva dias, M.A F., Nobre, C.A. (1989). Aspectos climatológicos das linhas de instabilidades da Amazônia. *Climanálise*, 4(11), pp. 34-39.

Collins, T. W. *et al*. (2013). Mapping vulnerability to climate change-related hazards: children at risk in a US–Mexico border metropolis. *Population and Environment*, 34(3), pp. 313-337.

Comissão externa do Senado Federal (2000). Comissão especial externa, criada por intermédio do requerimento Nº 426, de 2000-SF "Destinada a acompanhar o drama das enchentes nos estados de Pernambuco e Alagoas, que já ocasionaram morte e vítimas".

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 12(49), pp. 1671-1678.

Costa *et al.* (2005). Estimativas de Perdas de Solo para Microbacias Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 78, p.42.

Costa, F, H, S., Filho, C, R, S., Risso, A. (2009). Modelagem espaço-temporal da erosão e potencial contaminação de Arsênio e Chumbo na bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape (SP). *Revista brasileira de Geociências*, 2(39),pp 338 - 349.

Cronshey, R. G., Roberts, R. T., & Miller, N. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*, Technical Report 55. United States Department of Agriculture (USDA), 164p.

Crozier, M. (2013). Mass-movement hazards and risks, *Treatise on Geomorphology*, Mountain and Hillslope Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, (7), pp. 249–258.

Cutter, S. L. (1996) Vulnerability to environmental hazards, *Progress in Human Geography*, 20, pp. 529–539.

Dantas, J. R. A; Calheiros; M. E. V.; Torres, A. G.; Brito Neves, B. B. de (1985). *Mapa geológico do Estado de Alagoas Escala 1:250.000: texto e anexos*. Recife, Departamento Nacional de Produção Mineral.Serie mapas e cartas síntese, 2: Seção Geologia, 2, 90p.

Daudon, D., Moreiras, S. M., Beck, E. (2014). Multi Hazard scenarios in the Mendoza/San Juan provinces, Cuyo Region Argentina. *Procedia Economics and Finance*,18, pp. 560-567.

Delmonaco G., Margottini C., Spizzichino, D. (2006). *ARMONIA Report on new methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps*.ARMONIA Project - Applied Multi-Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assesment, Deliverable 3.1. Sustainable Development, Global Change and Ecosystems, European Community, Roma.

Delmonaco, G., Margottini, C., Spizzichino, D. (2007). *ARMONIA methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk map*. ARMONIA Project - Applied Multi-Risk Mapping of Natural Hazards for Impact Assessment, Deliverable 3.1.1.Sustainable Development, Global Change and Ecosystems, European Community, Roma.

Di Mauro, C., Bouchon, S., Carpignano, A., Golia, E., Peressin, S. (2006). Definition of multi-risk maps at regional level as management tool: experience gained by civil protection authorities of Piemonte region.*Proceedings of the 5th Conference on Risk Assessment and Management in the Civil and Industrial Settlements*, Università degli Studi, Pisa, Itália.

Diakakis, M. (2011). A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece. *Natural Hazards*, 56 (3), pp. 803-814.

Dias, M. A. F. S. (2014). Eventos Climáticos Extremos. *Revista USP*, 103, pp. 33.

Dilley, M., Chen, U., Deichmann, R.S., Lerner-Lam, A., Arnold, M. (2005). *Natural Disaster Hotspots: a Global Risk Analysis. Disaster Risk Management Series*, 5. The Word Bank. ISBN 0-8213-5930-4.

Downton, M. W., Miller, J. Z. B., Pielke Jr, R. A. (2005). Reanalysis of US National Weather Service flood loss database. *Natural Hazards Review*, 6(1), pp.13-22.

Dubey, D.P. Tiwari, R.N. (2011). Morphometric Analysis of Tons basin, Rewa District, Madhya Pradesh, based on watershed approach. *Earth Science India*, 4(3), pp. 171-180.

Dunning, M.C., Durden.S. (2011). *Social Vulnerability Analysis Methods for Corps Planning*. Final report. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Alexandria, VA.

Elbers, C., Lanjouw, J. O. e Lanjouw, P. (2002). *Micro-level estimation of welfare*. Policy Research Working Paper 1, The World Bank.

EMDAT. (2017). *OFDA/CRED International Disaster Database*, Université catholique de Louvain – Brussels – Belgium.

Eshrati, L., Mahmoudzadeh, A., Taghvaei, M. (2015). Multi hazards risk assessment, a new methodology. *International Journal of Health System and Disaster Management*, 3(2), pp. 79.

Etkin, D. (1999). Risk transference and related trends: driving forces towards more mega-disasters. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 1(2), pp. 69-75.

Eze, E. B., Joel, E. (2010). Morphometric Parameters of the Calabar River Basin: Implication for Hydrologic Processes. *Journal of Geography and Geology* 1(2), pp. 18-26.

FAO - Food and Agriculture Organization. (1980). *Metodologia provisional para evaluation de la degradacion de los suelos*. AO/PNUMA. UNEP. UNESCO. Roma. 86 p.

Farinasso, M., C, J, O. A., Guimarães, J, R.F., Gomes, R.A.T., Ramos, V.M. (2006). Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio

da EUPS - equação universal da perda de solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba-PI-MA. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2, pp.73-85.

Farr, T. G., *et al.* (2007). The Shuttle Radar Topography Mission *Reviews. Geophysics*, 3(45), pp.1-33.

Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., and Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management, *Landslide Risk Management*, London, pp. 3 - 25.

FEMA - Federal Emergency Management Agency. (2011). *Independent Study Course*, IS230, Principles of Emergency Management.

Ferreira, A. G., Mello, N. G. Silva. (2005). Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1(1), pp. 15-28.

Ferreira, R. V. *et al.* (2016). Origens das paisagens. *Geodiversidade do Estado de Alagoas*. Programa Geologia do Brasil, levantamento da Geodiversidade, Serviço Geológico do Brasil, 165p.

Filho, J. C. A. *et al.* (2000). ZAPE-Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco. *Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco*, Boletim de Pesquisa, 11, 325p.

Florenzano, T. G. (2016). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais, apresentação de Azziz Ab'Saber*. Oficina de Textos, p 490.

Forzieri, G. *et al* (2016). Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change*, 137(1-2), pp. 105-119.

Fragoso, C. R. J., Pedrosa, V. A., Souza, V. C. B (2010). Reflexões sobre a Cheia de junho de 2010 nas Bacias do Rio Mundaú e Paraíba. *Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Fortaleza. Anais, 10.

Francisco, P. R. M. *et al.* (2015). Mapeamento da aptidão edáfica para fruticultura segundo o zoneamento agropecuário do Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8 (6), pp. 377-390.

Furtado, J. *et al.* (2013). Capacitação Básica em Defesa Civil 4ª edição. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catarina, 122 p.

Furtado, J. *et al.* (2013). Capacitação Básica em Defesa Civil 4ª edição. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catarina, 122 p.

Gallina, V. (2015). *An advanced methodology for the multi-risk assessment: an application for climate change impacts in the North Adriatic case study (Italy)*, PhD, 80p.

Gallina, V. *et al.* (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of environmental management*, 168, pp. 123-132.

Gama, W. M., Almeida, A. J. P., Ferreira, J. V. (2011). Utilização de Técnicas de Geoprocessamento para Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva, Maceió/AL, *V Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Feira de Santana - BA. Anais do V GEONORDESTE / III Seminário de Geotecnologias*, 12p.

Gan, M.A., Kousky, V. E. (1982). Um Estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera nas latitudes subtropicais do atlântico sul e leste do Brasil. *Dissertação de mestrado*, Instituto de Pesquisa Espaciais - INPE, 25p.

Garcia, R. A. C. (2012). Metodologias de avaliação da perigosidade e risco associado a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer. *Dissertação de doutoramento em Geografia, especialidade Geografia Física*, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa. Lisboa. 437 p.

Garcia-Aristizabal Al. Marzocchi W. Di Ruocco, A. (2013). *New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe*. MATRIX.

Gill, J. C. Malamud, B. D. (2014). Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards, *Reviews of Geophysics*, 52, pp. 680-722.

Gill, Joel C., and Bruce D. Malamud. (2016). "Hazard Interactions and Interaction Networks (Cascades) within Multi-Hazard Methodologies." *Earth System Dynamics* 7(3), pp. 659-79.

Gomes, D. D. M., de Lima, D. R. M., Duarte, C. R., & Veríssimo, C. U. V. (2016). Mapeamento e caracterização dos sistemas ambientais da bacia hidrográfica do Rio Mundaú-PE/AL. *Caderno de Geografia*, 26(2), pp. 272-299.

- Granger, K., Hayne, M. (2001). *Natural Hazard & the risk they pose to South-East Queensland*. Australian Geological Survey Organisation and Bureau of Meteorology, 23p.
- Granger, K., Jones, T. G., Leiba, M., Scott, G. (1999). Community risk in Cairns: a multi-hazard risk assessment. *Australian Journal of Emergency Management*, Australian Institute for Disaster Resilience, 14(2), pp.20-30.
- Greiving, S., Fleischhauer, M., Lückenkötter, J. (2006). A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards. *Journal of environmental planning and management*, 49(1), pp. 1-19.
- Grünthal, G., Thieken, A. H., Schwarz, J., Radtke, K. S., Smolka, A., Merz, B. (2006). Comparative risk assessments for the city of Cologne—storms, floods, earthquakes. *Natural Hazards*, 38(1-2), pp. 21-44.
- Guerra, A. T., da Silva, A. S., & Botelho, R. G. M. (2009). Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Bertrand Brasil, 340p.
- Guillard, C., Zezere, J. (2012). Landslide Susceptibility Assessment and Validation in the Framework of Municipal Planning in Portugal: The Case of Loures Municipality. *Environmental Management*, 50(4), pp. 721-735.
- Guzzetti, F. *et al.* (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81 (1-2), pp. 166 - 184.
- Guzzetti, F. *et al.* (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1), pp. 42- 66.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development. *Geomorphology*, 31(1-4), pp.181-216.
- Horton, R.E (1945). Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin journal*, 56(3) pp. 275-370.
- Islam, M. A., Mitra, D., Dewan, A., Akhter, S. H. (2016). Coastal multi-hazard vulnerability assessment along the Ganges deltaic coast of Bangladesh—A geospatial approach. *Ocean & Coastal Management*, 127, pp. 1-15.
- Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J. L., Branco, M. C., Zêzere, J. L. (2009). *Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal*. ANPC, co-Ed. DGOTDU e IGP, 86p.

Kappes M.S. et al. (2012c). The Multirisk Platform: The Technical Concept and Application of a Regional-Scale Multihazard Exposure Analysis Tool. *Geomorphology*, 151-152, pp.139-155.

Kappes, M. S., Papathoma-Koehle, M., Keiler, M. (2012a). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32(2), pp. 577-590.

Kappes, M.S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., Glade, T. (2012b). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards*, 64, pp.1925 -1958.

Landis, J. R. and Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 33(1), pp. 159-174.

Lari, S., Frattini, P., Crosta, G. B. (2009). Integration of natural and technological risks in Lombardy, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), pp. 2085 - 2106.

Liebmann, B., Allured, D. (2005).Daily precipitation grids for South America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, pp.1567-1570.

Lima, A., Gama. A. (2008). A expansão da agroindústria canavieira no período do Proálcool (1975-1989): o caso alagoano. *Economia política do desenvolvimento*. 2(1) pp. 41-64.

Liu, B., Siu, Y. L., Mitchell, G. (2016). Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: a systematic classification based on hazard-forming environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(2), pp. 629-642.

Liu, B., Siu, Y. L., Mitchell, G., Xu, W. (2013). Exceedance probability of multiple natural hazards: risk assessment in China's Yangtze River Delta. *Natural hazards*, 69(3), pp. 2039-2055.

Lombardi Neto, F., Moldenhauer, W. C (1980). Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo*, 3, Recife, Anais,1.

Lyra, M. J. A. (2018). Influência dos processos físicos e sinóticos nas trajetórias dos complexos convectivos de mesoescala no nordeste brasileiro entre 2008 e 2015. *Dissertação de mestrado*, 72p.

Macarenhas, J. C. et al. (2005b).Diagnóstico do município de Lajedo, estado de Pernambuco. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. CPRM/PRODEEM.11p.

Machado, *et al.* (2009). Distúrbios Ondulatórios de Leste *Tempo e Clima no Brasil*. Oficina de Textos, São Paulo, p.15-22.

Maddox, R. A. (1980). Mesoscale convective complexes. *Buletin American Meteorological Society*, 11(61), pp.1374-1387.

Mahendra, R. S. *et al.* (2010). Coastal multi-hazard vulnerability mapping: a case study along the Coast of Nellore District, East coast of India. *Italian Journal of Remote Sensing*, 42(3), pp. 67-76.

Maidment, D.R. *et al.* (1996). Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. *Hydrol Process* 10, pp. 831-844.

Mannige, A.R., Carvalho, Morel de Passos., Moreti, D. Medeiros, L, R. (2002). Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum*.5(24), pp. 1335-1340.

Marques *et al* (2012). ZAAL - Zoneamento Agroecológico do Estado de Alagoas (2012). *Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Alagoas*. Relatório Técnico, 123p.

Marzocchi, W. *et al.* (2009). *Principles of multi-risk assessment: Interaction amongst natural and man-induced risks*, 76p.

Marzocchi, W. *et al.* (2012). Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy. *Natural hazards*, 62(2), pp. 551-573.

Mascarenhas, J. C. Beltrão, B, A. Souza, L, C. J. (2005a). *Diagnóstico do município de União dos Palmares*. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de alagoas. CPRM/PRODEEM.12p.

McCool, L.C. *et al.* (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation Trans. *American society agricultural engineers*. 30 (5), pp. 1387-1396.

Melo, A. B. C; Cavalcanti, I.F.A; Souza, P. P. (2009). Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. *Tempo e Clima no Brasil*. Oficina de Textos, São Paulo, pp.15-22.

Melo, R., Zezere, J. (2017). Avaliação da suscetibilidade à rutura e propagação de fluxos de detritos na bacia hidrográfica do rio zêzere (serra da estrela, Portugal). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 1 (18), pp. 81-106.

Michel-Kerjan, E. *et al* (2013). Catastrophe risk models for evaluating disaster risk reduction investments in developing countries. *Risk Analysis*, 33(6), pp. 984-999.

Middelmann, M., Granger, K. (2000). *Community Risk in Mackay A multi-hazard risk assessment*. Australian Geological Survey Organisation, 11p.

Mignan, A. (2013). *D7.1 Report on the MATRIX common IT platform v2* (New Multi-HAZard and MulTi-RIsK Assessment MethodS for Europe).

Miller, V. C (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristic in the Clinch Mountain area. *The journal of Geology*, 1(65), pp. 112-113.

Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2012). *Manuais Técnicos em Geociências número 1*. Manual Técnico da Vegetação Brasileira Sistema fitogeográfico Inventário das formações florestais e campestres Técnicas e manejo de coleções botânicas Procedimentos para mapeamentos, 2ª Edição revista e ampliada, 267p.

Molion, L.C.B.; Bernardo, S.O. (2002). Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17(1), pp. 1-10, 2002.

Monte, B. E. O. *et al.* (2016). Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), pp. 152 – 167.

Moore I. D., Burch G. J. (1986) - Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50, pp. 1294-1298.

Moore I.D., Wilson J.P. (1992) - Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, pp. 423-428.

Moreira, M. (2011). Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4 ed, p.262.

Mukhopadhyay, A. *et al* (2016). Characterizing the multi-risk with respect to plausible natural hazards in the Balasore coast, Odisha, India: a multi-criteria analysis (MCA) appraisal. *Natural Hazards*, 80(3), pp. 1495-1513.

Muzik I (1996b). *A GIS-derived distributed unit hydrograph. Proceeding of HydroGIS 96: application of geographic information systems in Hydrology and Water Resources Management*, April 1996, Vienna, IAHS Publ. no. 235.

Namias, J. (1972). Influence of Northern Hemisphere General Circulation on Drought in Northeast Brazil, *Tellus*, 24(4), pp. 336-342.

Neri, M. *et al.* (2013). A method for multi-hazard mapping in poorly known volcanic areas: an example from Kanlaon (Philippines). *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 13, pp. 1929-1943.

Noorbakhsh, M, E., Rahnama, M,B., Montazeri, S. (2005). Estimation of instantaneous unit hydrograph with Clark's method using GIS technique. *Journal of Applied Sciences*, 3(5), pp. 455 - 458.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. (2012b). *Disaster Risk Assessment and Financing. A G20/OECD Methodological Framework*. G2012 México, OECD.

OECD - Organization for Economic Co-operation and Development. (2012a). *Global Modelling of Natural Hazard Risks Enhancing Existing Capabilities to Address New Challenges*. Global Science Forum Global.

Oliveira, S. C., Zêzere, J. L., Catalão, J., & Nico, G. (2015). The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*, 12(4), pp. 703-719.

Oliveira, S. M. C. D. (2012). Incidência espacial e temporal da instabilidade geomorfológica na bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos). Dissertação de doutoramento em Geografia, especialidade Geografia Física, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa. Lisboa. 425 p.

Omidvar, B., Kivi, H. K. (2016). Multi-hazard failure probability analysis of gas pipelines for earthquake shaking, ground failure and fire following earthquake. *Natural Hazards*, 82(1), pp. 703-720.

Pereira, S., Zêzere, J. L., & Bateira, C. (2012). Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(4), pp. 979.

Peterson, T. C. *et al.* (1998). Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *International journal of climatology*, 18(13), pp. 1493-1517.

Pine, J. C. (2014). *Hazards Analysis: Reducing the Impact of Disasters*. 2nd Edition, CRC Press. ISBN: 978-1-4822-2891-5.

Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Mundaú – PDRH (1999). Secretaria de Meio Ambiente e Recursos hídricos do Estado de Alagoas – SEMARH.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2004). “*La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo*”. Nova York.

Queirós, M., Vaz, T., Palma, P. (2006). Uma reflexão a propósito do risco. *Actas do VI Congresso da Geografia Portuguesa*, Associação Portuguesa de Geógrafos, Lisboa.

Raj, N, P. P. Azeez, P. A. (2012). Morphometric Analysis of a Tropical Medium River System: A Case from Bharathapuzha River Southern India. *Open Journal of Modern Hydrology*, 4(2), pp. 91-98.

Ramos, A. M., Rebello, E. R. G. (2018). Normais Climatológicas do Brasil 1981 – 2010, *Instituto Nacional de Meteorologia – INMET*, edição digital, 747p.

Ramos, A. M., Santos, L, A, R., Fortes, L, T, G. (2009). Normais Climatológicas do Brasil 1961 – 1990, *Instituto Nacional de Meteorologia – INMET*, edição digital, 465 p.

Ramos, C. (2009). Dinâmica fluvial e ordenamento do território. Centro de estudos geográficos da universidade de Lisboa. Rainho & Neves, Lda./Santa Maria da Feira. Portugal.

Rawat, P. K., Tiwari, P. C., Pant, C. C. (2012). Geo-hydrological database modeling for integrated multiple hazards and risk assessment in Lesser Himalaya: a GIS-based case study. *Natural hazards*, 62(3), pp.1233-1260.

Reboita, M. S. (2016). Causas da semi-aridez do Sertão Nordestino. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19(12), pp. 254–277.

Reese, S., King, A., Bell, R., Schmidt, J. (2007). Regional RiskScape: a multi-hazard loss modelling tool. *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation*, pp. 1681-1687.

Reis, E., Zêzere, J. L., Vieira, G. T., Rodrigues, M. L. (2003). Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade de ocorrência de deslizamentos. *Finisterra*, 38(76), pp. 3 -34.

Reis, E.J. (2011). Análise de bacias hidrográficas, susceptibilidade à ocorrência de cheias e Sistemas de Informação Geográfica: da definição do quadro conceptual até à proposta de um modelo de avaliação. *VIII Congresso da Geografia Portuguesa*, APG, Lisboa, 6 p., CD ROM - SIG-130-598-2.

Reis, L. G.M., Silva Junior, O. B., Pedrosa, V, A. (2000) Análise da cheia de agosto de 2000 no rio Mundaú em alagoas, 8p.

Ribeiro, L, S., Alves, M, G. (2007). Quantificação de Perda de Solo por Erosão no município de Campos dos Goytacazes/RJ através de Técnicas de Geoprocessamento. *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil*. p. 3039-3046.

Rodrigues R.S. & Lacerda, F.F (1998). Agrupamento das Estações pluviométricas do Estado de Pernambuco Utilizando Análise Multivariada. *Revista Atmosfera & Água*, 3, pp. 22-26.

Santangelo, N.*et al.* (2011). Flood susceptibility assessment in a highly urbanized alluvial fan: the case study of Sala Consilina (southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(10), pp.2765-2780.

Santos, H, G. *et al.* (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos - SiBCS. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro, Embrapa - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária, 353 p.

Santos, J. C. B. *et al.* (2012). Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 3(36), pp.683-696.

Santos, P.P., Reis, E. (2017). Assessment of stream flood susceptibility: a cross-analysis between model results and flood losses. *Jornal of Flood Risk Management*. 11, pp.1-13.

Sartori, A., Lombardi Neto, F., & Genovez, A. M. (2005). Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4), pp. 5-18.

Schmidt, J. *et al.* (2011). Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling. *Natural Hazards*, 58(3), pp. 1169-1192.

Schmidt-Thomé, P. (2006). *The Spatial Effects and Management of Natural and Technological Hazards in Europe – Final Report of the European Spatial Planning and Observation Network (ESPON) project 1.3.1*. Geological Survey of Finland. ESPON Monitoring Committee, 197p.

Schumm, S. (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13, pp. 5-27.

Schuster, R. L. (1995). Landslide dams - a worldwide phenomenon. *Jornal of the Japan Landslide Society*, 31(4), pp. 38-49.

Seplan-AL. (1994). Secretaria de planejamento do estado de Alagoas. Núcleo estadual de meteorologia e recursos hídricos. *Recursos hídricos do estado de Alagoas*, 40p.

Silva, A. M., Alvares, C. A. (2005). Levantamento de informações e estruturação de um banco dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo. *Geociências*, 1(24), pp 33 - 41.

Silva, D. F., Araújo, L. E., Kayano, M. T., Sousa, F. A. S. (2008). Análise da Precipitação na Bacia do Rio Mundaú Usando IAC. *Ciências Exatas e Tecnologia*, 7, pp. 53-61.

Silva, F. H. B. B., Silva, M. S. L., Cavalcanti, A. C. (2005). Descrição das principais classes de solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos - CNPS, unidade de execução de pesquisa e desenvolvimento de Recife - UEP/Recife.

Silva, I. F., Andrade, A. P. (1984). Relatório de pesquisa sobre conservação do solo 1977 - 1984. *Areia, convênio SUDENE – UFPB*, p, 59.

Silva, R. M., Paiva, F. M. L. Santos, C. A. G. (2009). Análise do grau de erodibilidade e perdas de solo na bacia do rio Capim baseado em SIG e sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 1(2), pp. 26 - 40.

Smith, K., Ward, R. (1998). Flood: Physical Processes and Human Impacts. John Wiley & Sons. Chichester, 382p.

Soeters, R., Van Westen, C. L. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, pp.129-177, Washington D.C., USA.

Solomon, S., D. et al. (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press.

Song, C. et al (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote sensing of Environment*, 75, pp. 230-244.

Souza, E. B., Alves, J. M. B. (1998). Estudo diagnóstico de um complexo convectivo de mesoescala observado no norte do Nordeste do Brasileiro, *X CBMet e VIII Congresso da Flismet*.

Strahler, An. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union*, (38)6, pp. 913-920.

Swiss Re, S. (2012). *Natural catastrophes and man-made disasters in 2011: historic losses surface from record earthquakes and floods*. Sigma, 2, 40p.

Tavares, A., Cunha, L. (2009) - Riscos naturais e ordenamento do território espaços-risco e interfaces territoriais na Região Centro. *Actas do VI Congresso da Geografia Portuguesa*, Associação Portuguesa de Geógrafos Lisboa.

Teles, V. (2001). Riscos naturais e sociedade. Estudo de caso no concelho de Braga. *Revista Territorium*, 8, pp. 77-91.

Thierry, P., Stieltjes, L., Kouokam, E., Nguéya, P., Salley, P. M. (2008). Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the GRINP project at Mount Cameroon. *Natural Hazards*, 45(3), pp. 429-456.

Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. (1955). The water balance. *Climatology*, 1(8), Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 104p.

Tominaga, L. K., Santoro, J., do Amaral, R. (2009). *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. Instituto geológico de São Paulo, 196p.

Tonello, K, C. *et al.* (2006). Morfometria da bacia hidrográfica da cachoeira das pombas, Guanhães - MG. *Revista Árvore*, 5(30), pp.849-857.

Torres, F. S. M. (2016). Geodiversidade de Pernambuco, *programa geologia do Brasil, levantamento da geodiversidade*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 282p.

Tucci, C.E.M. (2008). *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre, Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 669p.

Tucker, C. J., Garrat, M. W. (1997). Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Applied Optics*, 3(16), pp. 635-42.

UNDRO – United Nations Disaster Relief Organization (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, Report of Expert Group Meeting 9-12 July 1979, Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, Geneva.

UNISDR – United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction (2012a). *Impacts of Disasters since the 1992 Rio de Janeiro Earth Summit*. Here's a look at the impact of disasters since the Earth Summit (1992-2012). Version 14 December.

UNISDR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2006). *Developing Early Warning Systems: A Checklist*. Outcome of the Third International Conference on Early Warning, hosted by the Government of Germany under the auspices of the United Nations, from 27 to 29 March 2006 in Bonn, Germany.

UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2017). Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment Hazard Specific Risk Assessment. 3. Landslide Hazard and Risk Assessment, 10p.

Vanoni, V. A. (1975). Sedimentation Engineering. *Manuals & Reports on Engineering Practice*, 54, ASCE, New York, USA, 405p.

Varazanashvili, O. et al (2012). Vulnerability, hazards and multiple risk assessment for Georgia. *Natural hazards*, 64(3), pp. 2021-2056.

Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. International Association of Engineering Geology, Commission on Landslides and Other Mass Movements. Natural Hazards, 3, UNESCO, Paris, 63p.

Villanueva, T. C. B. (2016). Geodiversidade do estado de Alagoas, *Programa Geologia do Brasil, levantamento da Geodiversidade*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 165p.

Villela, S. M., Mattos, A (1975). Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, p 245.

Vitte, A, C., Filho, L. R. V. (2006). Estimativa de perdas de solos em uma bacia hidrográfica sob o cultivo de frutíferas, no município de Valinhos (sp). *Espaço e Tempo*, 20, pp. 45-64.

Wischmeier, W. H., Smith, D. D (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. United States Department of Agriculture, Agriculture handbook, 537, 58p.

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. Davis, I. (2004). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. 2nd edition, Routledge, London and New York.

WMO - World Meteorological Organization (1999). *Comprehensive Risk Assessment for Natural Hazards*, WMO/TD 955, Geneva, Switzerland.

WMO - World Meteorological Organization (2018). *Multi-hazard Early Warning Systems: a Checklist*. Outcome of the first Multi-hazard Early Warning Conference 22 to 23 May 2017 – Cancún, Mexico.

Wu, Y.; Yin, K.; Liu, Y. (2000). Information analysis for landslides hazard zonation. *Landslides in research, theory and practice*. Proceeding of the 8th ISL, Cardiff. Vol.3. Thomas Telford, Londres, pp. 1593 - 1598.

Yan, T. Z. (1988). Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Lousanne, Balkema, Rotterdam, 2, pp.1263-1268.

Yang, S. H. *et al.* (2013). A systematic approach for the assessment of flooding hazard and risk associated with a landslide dam. *Natural hazards*, 65(1), pp. 41-62.

Yin, K.L., Yan, T.Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Lousanne, Balkema, Rotterdam, 2, pp. 1269-1272.

Zêzere, J. L. (2002). Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2, pp. 73-82.

Zêzere, J. L. *et al.* (2004). Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp.133-146.

Zêzere, J. L., Pereira, A. R., Morgado, P.(2006). Perigos naturais e tecnológicos no território de Portugal Continental. *Apontamentos de Geografia, Série de investigação*, 9, Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.

Zhou, Y., Liu, Y., Wu, W., Li, N. (2015). Integrated risk assessment of multi-hazards in China. *Natural Hazards*, 78(1), pp. 257-280.

ANEXOS

Anexo 1

Tabela 1 – Correlação mensal das diversas estações com a estação Caetés.

Est	Nv	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Ju	38	–	0,441	0,448	0,633	0,630	0,60	0,550	0,537	0,492	0,336	0,769	0,56
La	36	–	0,588	0,568	0,453	0,473	0,238	0,520	0,541	0,396	–	0,665	0,29
Cal	10	0,02	0,441	–	0,66	0,925	0,831	0,102	0,548	0,851	0,911	0,855	0,374
Ga1	37	–	0,693	0,623	0,563	0,762	0,695	0,402	0,523	0,527	0,482	0,756	0,66
Ga2	10	–	–	–	–	0,333	–	0,279	0,10	0,152	0,309	0,397	0,90
Ga4	15	–	0,818	0,42	0,951	0,779	0,851	-0,06	0,746	0,838	0,903	0,564	0,45
Bre1	27	0,38	0,470	0,334	0,275	0,635	0,281	0,434	0,256	0,466	–	0,833	0,59
Bre2	33	–	0,426	0,337	0,419	0,655	0,335	0,532	0,258	0,501	0,277	0,841	0,65
SJ	10	–	0,654	0,547	0,454	0,946	0,828	0,233	0,681	0,830	0,721	0,776	0,49
Ang	10	–	0,795	0,477	0,586	0,958	0,941	0,816	0,815	0,829	0,632	0,944	0,59
Can	26	–	0,616	0,295	0,489	0,429	0,450	0,103	0,287	0,412	0,084	0,673	0,43
BC	22	0,27	0,619	0,364	0,678	0,637	0,564	0,385	0,391	0,288	–	0,720	0,65
Co	28	0,33	0,729	0,286	0,267	0,572	0,197	0,122	0,495	0,680	0,386	0,752	0,24
Iba	26	0,52	0,651	0,378	0,344	0,206	0,185	–	–	0,522	0,307	0,160	–
USG	36	0,04	0,705	0,345	0,104	0,627	0,559	0,353	0,501	0,501	0,465	0,605	0,33
USJ	10	–	0,919	–	0,520	0,912	0,819	–	0,711	0,813	0,986	0,896	0,51
SM	10	–	0,134	–	0,295	0,935	0,514	0,284	0,711	0,688	0,615	0,478	0,15
UPC	10	–	0,432	–	0,595	0,968	–	–	0,474	0,827	0,784	0,927	0,57
UPD	28	0,38	0,621	0,449	0,146	0,686	0,569	0,527	0,310	0,242	0,264	0,487	0,30
Mu	37	0,02	0,650	0,260	0,179	0,726	0,426	0,276	0,429	0,526	0,360	0,701	0,32
FBF	11	–	0,487	–	0,423	0,880	0,286	0,098	0,306	0,648	0,511	0,537	0,52
Ata	28	0,46	0,659	0,537	0,221	0,489	0,402	0,170	0,279	0,567	0,404	0,398	0,28
Pil	27	0,36	0,490	0,307	–	0,713	0,033	0,134	0,295	0,242	0,268	0,343	0,61
RL	28	–	0,304	0,175	0,030	0,544	0,439	0,206	0,275	0,443	0,383	0,655	0,34
Ma	28	0,09	0,272	0,226	0,161	0,602	0,584	0,226	0,094	0,199	0,330	0,184	0,21

Nºv: Número de valores; Ju: Jucati; La: Lagedo; Cal: Calçado; Ga1: Garanhuns: INMET; Ga2- SUDENE; Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns-Itep; Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE; SJ: São João; Ang: Angelim; Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Co: Correntes; Iba: Ibateguara; USG: Usina Serra Grande (836094); USJL: São José da Lage (936112); SM: Santana do Mundaú; UPC: União dos Palmares (CPRM -936113); UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; RL: Rio Largo; FBF: Fazenda Boa Fortuna; Ata: Atalaia; Pil: Pilar; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 2 – Correlação mensal das diversas estações com a estação Jucati.

Est.	Nv	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Cap	11	0,501	0,327	0,656	0,915	0,687	0,586	–	0,795	0,665	0,638	0,447	0,921
La	46	0,29	0,568	0,592	0,753	0,595	0,440	0,726	0,616	0,848	0,739	0,882	0,678
Ca	38	–	0,441	0,448	0,633	0,630	0,600	0,550	0,537	0,492	0,336	0,769	0,561
Cal	14	0,449	0,175	0,574	0,387	0,593	0,894	–	0,670	0,40	0,604	0,514	0,710
Ga1	15	0,728	0,615	0,622	0,818	0,849	0,846	0,821	0,884	0,839	0,771	0,545	0,334
Ga2	10	0,302	–	0,256	–	0,147	–	0,291	0,337	0,658	0,526	0	0,316
Ga3	47	0,721	0,498	0,566	0,750	0,718	0,636	0,489	0,563	0,645	0,688	0,756	0,544
Ga4	23	0,464	0,050	0,583	0,795	0,753	0,685	–	0,651	0,527	0,476	0,543	0,114
Bre1	40	0,541	0,671	0,387	0,555	0,422	0,405	0,599	0,531	0,633	0,397	0,839	0,790
Bre2	27	0,591	0,690	0,246	0,352	0,296	0,303	0,610	0,582	0,571	0,356	0,890	0,832
SJ	14	0,586	–	0,174	0,635	0,814	0,650	0,425	0,473	0,579	0,793	0,499	0,401
Can	35	0,681	0,272	0,334	0,423	0,603	0,592	0,412	0,316	0,60	0,598	0,517	0,693
Co	28	0,249	0,646	0,374	0,467	0,850	0,074	0,505	0,864	0,527	0,665	0,702	0,609
Ang	18	0,604	0,053	0,471	0,605	0,719	0,761	0,257	0,579	0,507	0,653	0,175	0,445
BC	22	0,536	0,70	0,493	0,747	0,678	0,730	0,767	0,776	0,583	0,789	0,749	0,597
LO	10	0,576	0,119	0,197	0,573	0,742	0,424	0,361	0,545	–	0,877	0,526	0,651
Co	28	0,249	0,646	0,374	0,467	0,850	0,074	0,505	0,864	0,527	0,665	0,702	0,609
USG	47	0,261	0,273	0,333	0,534	0,720	0,645	0,557	0,550	0,551	0,817	0,556	0,637
USJ	22	0,378	0,495	0,529	0,622	0,807	0,571	0,130	0,507	0,504	0,640	0,215	0,552
Iba	26	0,547	0,149	0,037	0,165	0,324	0,097	0,227	–	0,418	–	–	–
SM	21	0,484	0,427	0,299	0,432	0,635	0,602	0,150	0,513	0,332	0,462	0,053	0,595
UPC	22	0,525	0,390	0,629	0,437	0,783	0,146	0,186	0,317	0,402	0,548	0,051	0,459
UPD	30	0,422	0,408	0,207	0,438	0,786	0,410	0,682	0,599	0,540	0,766	0,468	0,631
Mu	49	0,470	0,409	0,432	0,470	0,655	0,366	0,549	0,555	0,583	0,606	0,290	0,642
FBF	23	0,661	0,355	0,602	0,311	0,750	0,492	0,297	0,436	0,467	0,503	0,319	0,539
Ata	31	0,493	0,396	0,317	0,477	0,416	0,448	0,647	0,511	0,720	0,454	0,282	0,594
RL	36	0,262	0,392	0,138	0,452	0,265	0,499	0,554	0,308	0,644	0,441	0,467	0,685
Pil	27	0,346	0,291	0,278	0,269	0,487	0,236	0,593	0,552	0,335	0,697	0,012	0,643
Ma	32	0,127	0,312	0,083	0,289	0,740	0,350	0,586	0,322	0,575	0,488	0,043	0,390

Est: Estações; N°v: Número de valores; Cap:Capoeiras; La: Lagedo; Ca:Caetés; Cal: Calçado; Ga1: Garanhuns: INMET Ga2-SUDENE: Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns-Itep; Bre1: Brejão- SUDENE; Bre2: Brejão – IPA; SJ: São João; Can: Conhotinho; Ang: Angelim; BC: Bom Conselho; LO: Lagoa do Ouro; Co:Correntes; USG: Usina Serra Grande (836094); USJL: São José da Lage (936112); Iba: Ibateguara; SM: Santana do Mundaú; UPC: União dos Palmares (CPRM - 936113); UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu:Murici; FBF: Fazenda Boa Fortuna; Ata: Atalaia; RL: Rio Largo; Pil: Pilar; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 3 – Correlação mensal das diversas estações com a estação Lagedo.

Est	Nºv	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Ju	46	0,29	0,568	0,592	0,753	0,595	0,440	0,726	0,616	0,848	0,739	0,882	0,678
Ca	36	–	0,588	0,568	0,453	0,473	0,238	0,520	0,541	0,396	–	0,665	0,293
Cal	11	0,929	0,785	0,115	0,153	0,594	0,648	–	0,469	–	0,318	–	0,484
Ga1	15	0,449	0,608	0,390	0,676	0,299	0,170	0,839	0,741	0,949	0,798	0,500	0,023
Ga2	10	0,233	–	0,206	–	0,367	0,162	0,269	0,234	0,604	0,398	0,077	0,003
Ga3	47	0,721	0,498	0,566	0,750	0,718	0,636	0,489	0,563	0,645	0,688	0,756	0,544
Ga4	20	0,790	0,311	0,827	0,251	0,574	0,713	–	0,447	0,348	0,378	0,438	0,364
Bre1	40	0,535	0,321	0,518	0,543	0,563	0,383	0,608	0,440	0,561	0,462	0,739	0,626
Bre2	27	0,383	0,366	0,359	0,400	0,464	0,235	0,578	0,363	0,474	0,463	0,793	0,685
SJ	11	0,858	0,308	0,772	0,552	0,372	0,859	–	0,490	0,333	0,045	0,186	0,898
Ang	15	0,741	0,240	0,359	0,268	0,720	0,844	0,217	0,447	0,310	0,169	0,068	0,735
Can	31	0,535	0,214	0,229	0,281	0,620	0,013	0,442	0,380	0,612	0,566	0,516	0,562
BC	22	0,287	0,472	0,421	0,584	0,140	0,461	0,662	0,694	0,556	0,701	0,593	0,295
Co	28	0,087	0,624	0,515	0,601	0,428	0,185	0,625	0,678	0,375	0,392	0,733	0,642
Iba	26	0,075	0,369	0,229	–	0,145	0,160	0,338	–	0,427	–	–	0,009
SM	18	0,764	0,298	–	–	0,602	0,479	–	0,793	0,412	0,190	0,058	0,488
USG	46	0,395	0,296	0,159	0,463	0,461	0,334	0,534	0,740	0,472	0,533	0,492	0,651
USJL	18	0,649	0,319	0,160	0,590	0,842	0,795	–	0,791	0,560	0,323	0,157	0,735
UPC	18	0,649	0,546	0,138	0,353	0,635	0,662	–	0,743	0,401	0,398	0,070	0,687
UPD	30	0,494	0,587	0,475	0,245	0,457	0,179	0,707	0,532	0,539	0,613	0,557	0,573
Mu	45	0,360	0,498	0,389	0,281	0,445	0,254	0,534	0,695	0,484	0,426	0,303	0,698
FBF	19	0,676	0,348	0,150	0,162	0,558	0,195	0,633	0,653	0,640	0,370	0,227	0,862
Ata	31	0,514	0,569	0,519	0,360	0,012	0,263	0,731	0,462	0,503	0,211	0,370	0,602
Pi	27	0,097	0,351	0,102	0,217	0,193	0,049	0,523	0,504	0,116	0,525	0,180	0,487
R L	36	0,458	0,401	0,412	0,203	0,399	0,348	0,557	0,167	0,675	0,543	0,386	0,669
Ma	32	0,344	0,457	0,348	0,385	0,517	0,507	0,618	0,370	0,617	0,460	0,205	0,287

Est: Estações; Nºv: Número de valores; Ju:Jucati; Ca:Caetés; Cal: Calçado; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Bre1: Brejão-SUDENE; Bre2: Brejão-IPA;SJ: São João; Ang: Angelim; Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Co:Correntes; Iba: Ibateguara; SM: Santana do Mundaú; USG: Usina Serra Grande (836094); USJL: São José da Lage (936112); UPC: União dos Palmares (CPRM -936113); UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; Ata:Atalaia; Pil: Pilar; RL: Rio Largo; FBF: Fazenda Boa Fortuna; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 4 – Correlação mensal das diversas estações com a estação Garanhuns.

Est.	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan
Cap	26	0,442	0,60	0,74	0,80	0,60	0,9	–	0,58	0,51	0,96	0,32	0,46
Ju	45	0,721	0,49	0,56	0,75	0,71	0,6	0,48	0,56	0,64	0,68	0,75	0,54
La	42	0,502	0,45	0,65	0,60	0,40	0,3	0,36	0,56	0,50	0,47	0,71	0,45
Ca	37	–	0,69	0,62	0,56	0,76	0,6	0,40	0,52	0,52	0,48	0,75	0,66
Cal	14	0,919	0,44	0,66	0,63	0,69	0,7	0,35	0,43	0,64	0,96	0,67	0,45
Ga2	6	0,832	0,03	0,05	–	0,47	0,0	0,10	0,35	0,05	–	0,53	0,43
Ga3	6	0,544	0,99	0,72	0,91	–	0,4	0,49	0,97	0,91	1,00	0,82	0,99
Ga4	22	0,928	0,77	0,88	0,78	0,89	0,9	0,79	0,73	0,90	0,95	0,71	0,93
Bre1	27	0,812	0,63	0,43	0,63	0,57	0,4	0,31	0,31	0,58	0,33	0,81	0,64
Bre2	40	0,581	0,65	0,34	0,47	0,59	0,4	0,53	0,52	0,59	0,14	0,80	0,87
SJ	15	0,948	0,67	0,50	0,75	0,92	0,9	0,43	0,71	0,87	0,91	0,88	0,58
Ang	18	0,961	0,70	0,60	0,75	0,72	0,9	0,34	0,64	0,90	0,76	0,50	0,74
Can	34	0,796	0,49	0,61	0,65	0,50	0,7	0,54	0,50	0,68	0,75	0,50	0,50
LO	10	0,957	0,75	0,75	0,58	0,78	0,6	–	0,80	0,55	0,95	0,85	0,78
BC	21	0,462	0,60	0,80	0,69	0,84	0,7	0,52	0,76	0,65	0,42	0,76	0,66
Co	27	0,171	0,75	0,55	0,58	0,77	0,2	0,54	0,67	0,75	0,94	0,73	0,63
USG	43	0,756	0,64	0,41	0,64	0,82	0,8	0,57	0,78	0,78	0,71	0,65	0,53
USJL	21	0,890	0,71	0,29	0,85	0,87	0,8	0,64	0,72	0,80	0,85	0,50	0,22
Iba	37	0,405	0,61	0,25	0,09	0,36	0,0	0,33	–	0,63	–	–	0,12
SM	21	0,926	0,39	0,15	0,64	0,85	0,8	0,28	0,61	0,64	0,81	0,18	0,29
UPC	21	0,873	0,60	0,46	0,68	0,89	0,4	0,23	0,58	0,72	0,78	0,17	0,51
UPD	21	0,422	0,74	0,47	0,51	0,92	0,6	0,65	0,61	0,65	0,53	0,39	0,67
Mu	47	0,698	0,59	0,48	0,66	0,87	0,7	0,59	0,73	0,82	0,64	0,37	0,55
FBF	22	0,786	0,67	0,46	0,56	0,74	0,8	0,41	0,66	0,70	0,70	0,28	0,08
Ata	29	0,370	0,61	0,62	0,44	0,73	0,5	0,45	0,45	0,78	0,40	0,27	0,64
Pi	27	0,245	0,46	0,48	0,24	0,78	0,1	0,32	0,60	0,23	0,51	0,22	0,80
R L	33	0,333	0,55	0,23	0,34	0,57	0,5	0,16	0,19	0,60	0,40	0,41	0,57

Est: Estações; N°v: Número de valores; Cap: Capoeiras; Ju: Jucati; La – Lagedo; Ca: Caetés; Cal: Calçado; Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão - SUDENE; SJ: São João; Ang: Angelim; Can: Conhotinho; LO: Lagoa do Ouro; BC: Bom Conselho; Co: Correntes; USG: Usina Serra Grande (836094); USJL: São José da Lage (936112); Iba: Ibateguara; SM: Santana do Mundaú; UPC: União dos Palmares (CPRM-936113); UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; FBF: Fazenda Boa Fortuna; Ata: Atalaia; Pil: Pilar; RL: Rio Largo.

Tabela 5 – Correlação das diversas estações com a estação Brejão.

Est.	Nv	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Ju	27	0,591	0,690	0,246	0,352	0,296	0,303	0,610	0,582	0,571	0,356	0,890	0,832
La	27	0,383	0,366	0,359	0,400	0,464	0,235	0,578	0,363	0,474	0,463	0,793	0,685
Ca	27	0,384	0,470	0,334	0,275	0,635	0,281	0,434	0,256	0,466	–	0,833	0,593
Ga1	15	0,50	0,580	0	0,551	0,661	0,412	0,668	0,454	0,812	–	0,745	0,749
Ga2	10	0,747	0,046	0,422	0,568	0,610	0,788	0,385	0,676	0,525	0,418	0,646	0,10
Ga3	27	0,581	0,651	0,347	0,479	0,591	0,463	0,534	0,524	0,591	0,146	0,806	0,872
Bre1	25	1,0	1,0	1,0	1,0	0,980	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Can	17	0,635	0,509	0,479	0,127	0,657	0,290	0,466	0,553	0,546	–	0,542	0,947
BC	22	0,299	0,787	0,511	0,273	0,645	0,138	0,636	0,394	0,403	0,282	0,828	0,704
Iba	26	0,429	0,260	0,066	–	–	–	–	–	0,340	–	–	0,044
Co	27	0,473	0,633	0,405	0,532	0,360	0,320	0,693	0,556	0,586	0,160	0,786	0,782
USG	27	0,598	0,361	0,381	0,338	0,493	0,377	0,755	0,408	0,674	0,331	0,596	0,819
UPD	27	0,61	0,470	0,348	0,079	0,500	0,398	0,844	0,419	0,398	0,521	0,533	0,757
Mu	27	0,313	0,416	0,57	0,3	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,425	0,441	0,846
Ata	27	0,587	0,441	0,598	0,239	0,563	0,51	0,719	0,253	0,560	0,255	0,273	0,746
Pil	27	0,159	0,403	0,471	0,459	0,653	–	0,433	0,232	0,381	0,265	0,128	0,849
R L	27	0,188	0,380	0,468	0,198	0,896	0,392	0,568	0,407	0,778	0,806	0,563	0,705
Ma	27	0,365	0,390	–	0,052	0,453	0,293	0,485	0,199	0,264	0,310	–	0,422

Est: Estações; N°v:Número de valores; Ju:Jucati; La – Lagedo; Cal: Calçado; Ga1: Garanhuns (INMET); Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Bre1: Brejão – IPA; Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Iba: Ibateguara; Co: Correntes; USG: Usina Serra Grande (836094); UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; Ata: Atalaia; Pil: Pilar; RL: Rio Largo; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 6 – Correlação das diversas estações com a estação Correntes.

Est.	Nv	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Ju	28	0,249	0,646	0,374	0,467	0,850	0,074	0,505	0,864	0,527	0,665	0,702	0,609
La	28	0,087	0,624	0,515	0,601	0,428	0,185	0,625	0,678	0,375	0,392	0,733	0,642
Ca	28	0,331	0,729	0,286	0,267	0,572	0,197	0,122	0,495	0,680	0,386	0,752	0,245
Ga1	15	0,495	0,659	0,368	0,725	0,816	0,658	0,817	0,864	0,745	0,982	0,773	0,184
Ga2	38	0,323	–	0,232	0,058	0,113	0,193	–	0,175	0,001	0,484	0,206	0,078
Ga3	27	0,171	0,756	0,559	0,588	0,777	0,280	0,540	0,676	0,756	0,947	0,733	0,631
Ga4	30	0,572	0,399	0,826	0,235	0,162	0,262	–	0,263	0,282	0,409	0,172	0,179
Bre2	25	0,457	0,628	0,409	0,537	0,340	0,505	0,667	0,581	0,582	0,143	0,773	0,768
Bre1	27	0,473	0,633	0,405	0,532	0,360	0,320	0,693	0,556	0,586	0,160	0,786	0,782
Can	17	0,532	0,636	0,254	0,463	0,483	0,652	0,717	0,839	0,759	0,813	0,717	0,812
B C	49	0,092	0,355	0,224	0,381	0,118	0,151	0,198	0,135	0,164	0,273	0,236	0,455
USG	55	0,404	0,564	0,441	0,473	0,218	0,158	0,628	0,342	0,494	0,535	0,391	0,713
UPD	52	0,472	0,704	0,569	0,417	0,286	0,278	0,621	0,231	0,385	0,466	0,533	0,663
Iba	26	0,297	0,511	0,357	–	0,285	–	0,219	–	0,836	–	0,266	0,140
Mu	27	0,083	0,698	0,590	0,548	0,695	0,376	0,769	0,476	0,614	0,486	0,674	0,762
Ata	55	0,381	0,633	0,421	0,314	0,014	0,225	0,491	0,165	0,477	0,442	0,386	0,535
Pil	27	0,654	0,649	0,523	0,407	0,503	0,182	0,582	0,464	0,089	0,449	0,544	0,568
R L	27	0,019	0,543	0,228	0,145	0,322	0,011	0,381	0,367	0,350	0,342	0,534	0,410
Ma	55	0,291	0,419	0,044	0,091	0,411	0,099	0,535	0,105	0,333	0,304	0,496	0,311

Est: Estações; N°v :Número de valores; Ju: Jucati; La: Lagedo; Ca:Caetés; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep);Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE; Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; USG: Usina Serra Grande (836094); Iba: Ibateguara; UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; Ata: Atalaia; Pil: Pilar; R L: Rio Largo; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 7 – Correlação das diversas estações com a estação Usina Serra Grande.

Est.	Nv	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Ju	47	0,26	0,273	0,333	0,534	0,720	0,645	0,557	0,550	0,551	0,817	0,556	0,637
La	46	0,39	0,296	0,159	0,463	0,461	0,334	0,534	0,740	0,472	0,533	0,492	0,651
Ca	36	0,04	0,705	0,345	0,104	0,627	0,559	0,353	0,501	0,501	0,465	0,605	0,331
Cal	12	0,961	0,413	0,553	0,781	0,689	0,814	0,166	0,691	0,801	0,934	0,691	0,015
Ga1	18	0,025	0,619	0,372	0,589	0,799	0,503	0,812	0,197	0,932	0,673	0,18	0,521
Ga2	51	0,281	0,337	0,143	0,459	0,718	0,712	0,192	0,774	0,745	0,627	0,817	0,169
Ga3	44	0,756	0,648	0,413	0,643	0,829	0,848	0,570	0,787	0,783	0,711	0,652	0,534
Ga4	57	0,786	0,489	0,509	0,663	0,746	0,860	0,185	0,763	0,732	0,675	0,810	0,214
Bre1	40	0,753	0,372	0,243	0,450	0,399	0,389	0,546	0,361	0,628	0,474	0,658	0,678
Bre2	27	0,598	0,361	0,381	0,338	0,493	0,377	0,755	0,408	0,674	0,331	0,596	0,819
SJ	12	0,926	0,594	–	0,836	0,754	0,917	0,424	0,543	0,845	0,925	0,725	0,604
Ang	17	0,934	0,702	0,784	0,765	0,889	0,953	0,506	0,512	0,771	0,706	0,614	0,661
Can	33	0,581	0,548	0,629	0,592	0,656	0,746	0,623	0,577	0,629	0,734	0,521	0,717
BC	50	0,185	0,315	0,368	0,339	0,539	0,435	0,396	0,493	0,526	0,572	0,645	0,332
Co	55	0,404	0,564	0,441	0,473	0,218	0,158	0,628	0,342	0,494	0,535	0,391	0,713
USJL	20	0,953	0,895	0,908	0,843	0,910	0,868	0,761	0,923	0,934	0,897	0,598	0,838
Iba	26	0,488	0,832	0,307	–	0,331	–	0,277	0,133	0,607	0,218	0,460	0,355
SM	19	0,920	0,489	0,669	0,650	0,746	0,874	0,242	0,763	0,926	0,755	0,319	0,510
UPC	20	0,863	0,648	0,831	0,768	0,825	0,595	0,687	0,780	0,827	0,807	0,339	0,788
UPD	64	0,667	0,499	0,812	0,727	0,794	0,739	0,751	0,669	0,596	0,849	0,722	0,775
Mu	46	0,716	0,612	0,744	0,790	0,770	0,760	0,898	0,843	0,846	0,774	0,508	0,778
FBF	21	0,737	0,720	0,677	0,645	0,794	0,743	0,678	0,757	0,795	0,745	0,462	0,896
Ata	71	0,550	0,492	0,696	0,685	0,734	0,592	0,721	0,746	0,705	0,712	0,553	0,712
RL	36	0,341	0,378	0,484	0,374	0,366	0,325	0,399	0,133	0,688	0,567	0,473	0,403
Pil	27	0,304	0,524	0,80	0,708	0,718	0,533	0,712	0,735	0,295	0,851	0,367	0,693
Ma	72	0,477	0,292	0,436	0,439	0,748	0,465	0,602	0,557	0,599	0,585	0,377	0,363

Est: Estações; N°v: Número de valores; Ju: Jucati; Ca: Caetés; Cal: Calçado; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE; SJ: São João; Ang: Angelim; Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Co:Correntes; USJL: São José da Lage (936112); Iba: Ibateguara; SM: Santana do Mundaú; UPC: União dos Palmares (CPRM -936113); UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; FBF: Fazenda Boa Fortuna; Ata:Atalaia; R L: Rio Largo; Pil: Pilar; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 8 – Correlação das diversas estações com a estação União dos Palmares.

Est.	Nv	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Ju	30	0,422	0,408	0,207	0,438	0,786	0,410	0,682	0,599	0,540	0,766	0,468	0,631
La	30	0,494	0,587	0,475	0,245	0,457	0,179	0,707	0,532	0,539	0,613	0,557	0,573
Ca	28	0,385	0,621	0,449	0,146	0,686	0,569	0,527	0,310	0,242	0,264	0,487	0,301
Ga1	27	0,777	0,426	0,352	0,776	0,864	0,489	0,614	0,611	0,651	0,546	0,323	0,638
Ga2	47	0,369	–	0,093	0,473	0,714	0,719	0,019	0,629	0,482	0,681	0,721	0,113
Ga3	28	0,422	0,740	0,477	0,517	0,921	0,655	0,650	0,617	0,657	0,531	0,393	0,674
Ga3	40	0,481	0,212	0,634	0,861	0,833	0,860	0,153	0,796	0,682	0,773	0,732	0,212
Bre1	25	0,60	0,464	0,359	0,080	0,513	0,393	0,803	0,414	0,385	0,508	0,533	0,676
Bre2	27	0,61	0,470	0,348	0,079	0,500	0,398	0,844	0,419	0,398	0,521	0,533	0,757
Can	17	0,395	0,508	0,392	0,199	0,361	0,425	0,482	0,056	0,563	0,606	0,605	0,820
BC	46	0,319	0,424	0,294	0,431	0,693	0,619	0,367	0,544	0,436	0,572	0,571	0,393
Cor	52	0,472	0,704	0,569	0,417	0,286	0,278	0,621	0,231	0,385	0,466	0,533	0,663
USG	64	0,667	0,499	0,812	0,727	0,794	0,739	0,751	0,669	0,596	0,849	0,722	0,775
Iba	26	0,356	0,589	0,618	0,293	0,415	–	0,104	–	0,582	0,183	0,315	0,465
Mu	29	0,823	0,875	0,662	0,729	0,880	0,669	0,777	0,628	0,631	0,839	0,575	0,836
At	73	0,670	0,788	0,630	0,749	0,764	0,636	0,652	0,729	0,681	0,800	0,635	0,783
RL	29	0,413	0,564	0,327	0,078	0,439	0,428	0,477	–	0,378	0,677	0,492	0,511
Pil	27	0,219	0,730	0,482	0,264	0,731	0,445	0,498	0,626	0,099	0,859	0,404	0,696
Ma	74	0,572	0,533	0,396	0,394	0,798	0,629	0,629	0,557	0,478	0,783	0,484	0,505

Est: Estações; N°v: Número de valores; Ju: Jucati; La: Lagedo; Ca: Caetés; ; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE; Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Cor: Correntes; USG: Usina Serra Grande (836094); Iba: Ibateguara; Mu: Murici; Ata: Atalaia; R L: Rio Largo; Pil: Pilar; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 9 – Correlação das diversas estações com a estação Murici.

Est.	Nv	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Cap	11	0,317	0,533	0,389	0,334	0,452	0,627	0,564	0,378	0,282	0,751	0,262	0,415
Ju	49	0,470	0,409	0,432	0,470	0,655	0,366	0,549	0,555	0,583	0,606	0,290	0,642
La	45	0,360	0,498	0,389	0,281	0,445	0,254	0,534	0,695	0,484	0,426	0,303	0,698
Ca	37	0,020	0,650	0,260	0,179	0,726	0,426	0,276	0,429	0,526	0,360	0,701	0,323
Cal	13	0,689	0,345	0,534	0,939	0,787	0,367	0,420	0,610	0,634	0,829	0,759	0,132
Ga1	15	0,405	0,476	0,496	0,656	0,984	0,528	0,863	0,792	0,889	0,568	–	0,418
Ga2	10	0,243	–	0,052	0,065	0,473	0,328	–	0,411	0,155	0,061	–	–
Ga3	50	0,698	0,596	0,489	0,669	0,877	0,722	0,595	0,731	0,827	0,643	0,375	0,552
Ga4	22	0,719	0,360	0,453	0,541	0,743	0,677	-0,43	0,503	0,740	0,768	0,634	0,375
Bre1	40	0,651	0,469	0,542	0,434	0,639	0,385	0,460	0,411	0,655	0,583	0,406	0,843
Bre2	27	0,313	0,416	0,574	0,269	0,613	0,428	0,618	0,445	0,567	0,425	0,441	0,846
SJ	14	0,805	0,470	–	0,851	0,830	0,550	0,340	0,611	0,778	0,950	0,903	0,616
Ang	18	0,840	0,851	0,707	0,628	0,859	0,683	0,318	0,481	0,819	0,874	0,865	0,756
Can	35	0,686	0,617	0,664	0,485	0,391	0,708	0,564	0,574	0,694	0,582	0,783	0,798
LO	10	0,776	0,895	0,222	–	0,747	0,438	0,097	0,700	0,251	0,991	0,695	0,560
BC	21	0,292	0,486	0,662	0,390	0,812	0,588	0,608	0,659	0,592	0,571	0,527	0,439
Co	27	0,083	0,698	0,590	0,548	0,695	0,376	0,769	0,476	0,614	0,486	0,674	0,762
USG	46	0,716	0,612	0,744	0,790	0,770	0,760	0,898	0,843	0,846	0,774	0,508	0,778
USJL	25	0,819	0,858	0,910	0,738	0,815	0,781	0,777	0,809	0,915	0,608	0,904	0,694
Iba	26	0,098	0,445	0,384	0,023	0,251	–	0,329	0,008	0,463	0,532	0,740	0,212
SM	24	0,820	0,803	0,748	0,867	0,870	0,903	0,457	0,735	0,880	0,882	0,886	0,446
UPC	24	0,887	0,816	0,898	0,778	0,873	0,786	0,749	0,918	0,881	0,776	0,914	0,631
UPD	29	0,823	0,875	0,662	0,729	0,880	0,669	0,777	0,628	0,631	0,839	0,575	0,836
FBF	25	0,786	0,818	0,520	0,868	0,787	0,814	0,814	0,885	0,885	0,834	0,823	0,764
At	30	0,468	0,924	0,896	0,797	0,737	0,489	0,728	0,600	0,858	0,829	0,761	0,795
R L	36	0,469	0,580	0,656	0,414	0,591	0,389	0,258	0,027	0,570	0,550	0,587	0,629
Pil	27	0,137	0,678	0,743	0,628	0,776	0,322	0,705	0,710	0,456	0,889	0,639	0,755
Ma	31	0,217	0,711	0,434	0,263	0,715	0,212	0,738	0,579	0,681	0,779	0,301	0,445

Est: Estações; N°v: Número de valores; Ju: Jucati; Ca :Caetés; Cal: Calçado; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Brejão – IPA; Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE; SJ: São João; Ang: Angelim; Can: Conhotinho; LO: Lagoa do Ouro; BC: Bom Conselho; Co: Correntes; USG: Usina Serra Grande (836094); USJL: São José da Lage (936112); Iba: Ibateguara; SM: Santana do Mundaú; UPC: União dos Palmares (CPRM - 936113); UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); FBF: Fazenda Boa Fortuna; Ata: Atalaia; Fortuna; R L: Rio Largo; Pil: Pilar; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 10 – Correlação das diversas estações com a estação Atalaia.

Est.	N v	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Ju	31	0,493	0,396	0,317	0,477	0,416	0,448	0,647	0,511	0,720	0,454	0,282	0,594
La	31	0,514	0,569	0,519	0,360	0,012	0,263	0,731	0,462	0,503	0,211	0,370	0,602
Ca	28	0,460	0,659	0,537	0,221	0,489	0,402	0,170	0,279	0,567	0,404	0,398	0,288
Ga1	27	0,564	0,233	0,445	0,538	0,689	0,640	0,780	0,384	0,648	0,451	0,668	0,368
Ga2	53	0,248	0,082	0,030	0,578	0,722	0,791	0,274	0,724	0,689	0,528	0,650	0,055
Ga3	29	0,370	0,619	0,622	0,447	0,732	0,550	0,456	0,453	0,781	0,407	0,273	0,641
Ga4	44	0,247	0,323	0,501	0,663	0,691	0,864	0,209	0,801	0,756	0,557	0,663	0,093
Bre1	27	0,592	0,455	0,617	0,243	0,488	0,531	0,670	0,293	0,551	0,242	0,224	0,688
Bre2	27	0,587	0,441	0,598	0,239	0,563	0,505	0,719	0,253	0,560	0,255	0,273	0,746
Can	18	0,758	0,434	0,725	0,269	0,069	0,473	0,649	0,050	0,659	0,481	0,782	0,786
BC	50	0,208	0,521	0,603	0,381	0,551	0,413	0,283	0,598	0,564	0,275	0,598	0,313
Cor	55	0,381	0,633	0,421	0,314	0,014	0,225	0,491	0,165	0,477	0,442	0,386	0,535
USG	71	0,550	0,492	0,696	0,685	0,734	0,592	0,721	0,746	0,705	0,712	0,553	0,712
Iba	26	0,188	0,522	0,251	0,182	0,161	—	0,247	—	0,596	0,427	0,525	0,447
UPD	73	0,670	0,788	0,630	0,749	0,764	0,636	0,652	0,729	0,681	0,800	0,635	0,783
Mu	30	0,468	0,924	0,896	0,797	0,737	0,489	0,728	0,600	0,858	0,829	0,761	0,795
Pil	27	0,289	0,751	0,684	0,579	0,777	—	0,664	0,684	0,403	0,833	0,690	0,698
R L	29	0,288	0,550	0,566	0,306	0,504	0,564	0,584	0,134	0,482	0,428	0,351	0,584
Ma	81	0,673	0,673	0,567	0,589	0,715	0,511	0,522	0,459	0,549	0,777	0,474	0,591

Est: Estações; N°v: Número de valores; Ju:Jucati; La: Lagedo; Ca:Caetés; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE;Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Cor:Correntes; USG:Usina Serra Grande (836094); Iba: Ibateguara UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu:Murici; Pil: Pilar; R L: Rio Largo; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 11 – Correlação das diversas estações com a estação Rio Largo.

Est.	Nºv	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Ju	36	0,262	0,392	0,138	0,452	0,265	0,499	0,554	0,308	0,644	0,441	0,467	0,685
La	36	0,458	0,401	0,412	0,203	0,399	0,348	0,557	0,167	0,675	0,543	0,386	0,669
Ca	28	–	0,304	0,175	0,03	0,544	0,439	0,206	0,275	0,443	0,383	0,655	0,349
Ga1	10	0,366	–	0,616	0,838	0,349	0,543	–	0,643	0,813	0,942	0,450	0,556
Ga2	15	0,290	0,470	0,023	0,535	0,688	0,669	0,656	0,213	0,717	0,255	0,228	0,120
Gar3	10	0,442	–	0,599	0,285	0,694	0,770	0,303	0,620	0,667	0,298	0,204	0,180
Ga4	35	0,333	0,550	0,233	0,342	0,577	0,519	0,160	0,199	0,602	0,403	0,418	0,578
Bre1	32	0,291	0,427	0,511	0,269	0,882	0,533	0,596	0,401	0,819	0,818	0,413	0,826
Bre2	27	0,188	0,380	0,468	0,198	0,896	0,392	0,568	0,407	0,778	0,806	0,563	0,705
Can	24	0,329	0,490	0,673	0,243	0,664	0,257	0,514	0,164	0,461	0,422	0,164	0,835
BC	21	–	0,141	0,052	0,103	0,549	0,649	0,772	0,301	0,323	0,336	0,498	0,487
Co	27	0,019	0,543	0,228	0,145	0,322	0,011	0,381	0,367	0,350	0,342	0,534	0,410
USG	36	0,341	0,378	0,484	0,374	0,366	0,325	0,399	0,133	0,688	0,567	0,473	0,403
Ibat	26	–	0,182	–	–	–	–	0,153	–	0,213	0,010	0,401	–
UPD	29	0,413	0,564	0,327	0,078	0,439	0,428	0,477	–	0,378	0,677	0,492	0,511
Mu	36	0,469	0,580	0,656	0,414	0,591	0,389	0,258	0,027	0,570	0,550	0,587	0,629
FBF	10	0,688	0,275	0,840	0,651	–	0,133	0,172	–	0,927	0,493	0,914	0,438
At	29	0,288	0,550	0,566	0,306	0,504	0,564	0,584	0,134	0,482	0,428	0,351	0,584
Pil	27	0,08	0,477	0,396	0,404	0,632	–	0,224	–	0,215	0,431	0,225	0,666
Ma	30	0,361	0,551	0,544	0,148	0,438	0,465	0,200	0,01	0,356	0,465	0,11	0,314

Est: Estações; Nºv: Número de valores; Ju:Jucati; La: Lagedo; Ca:Caetés; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3:Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE;Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Co: CorrentesUSG: Usina Serra Grande (836094); Iba: Ibateguara; UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; FBF: Fazenda Boa Fortuna; Ata: Atalaia; Pil: Pilar; Ma: Maceió (DNOCS).

Tabela 12 – Correlação das diversas estações com a estação Maceió.

Est.	Nºv	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Ju	32	0,127	0,312	0,083	0,289	0,740	0,350	0,586	0,322	0,575	0,488	0,043	0,390
La	32	0,344	0,457	0,348	0,385	0,517	0,507	0,618	0,370	0,617	0,460	0,205	0,287
Ca	28	0,093	0,272	0,226	0,161	0,602	0,584	0,226	0,094	0,199	0,330	0,184	0,210
Ga1-	44	0,096	0,461	0,161	0,486	0,651	0,699	0,103	0,637	0,552	0,417	0,348	0,180
Ga2-	27	0,541	0,349	0,363	0,321	0,754	0,646	0,531	0,418	0,551	0,331	0,026	0,227
Ga3-	53	0,187	0,30	–	0,555	0,674	0,518	0,112	0,433	0,411	0,376	0,336	0,251
Ga	29	–	0,41	0,046	0,023	0,785	0,459	0,580	0,340	0,524	0,378	0,109	0,438
Bre	27	0,365	0,390	–	0,052	0,453	0,293	0,485	0,199	0,264	0,310	–	0,422
Bre-	27	0,441	0,419	–	0,070	0,392	0,325	0,364	0,215	0,347	0,275	–	0,298
Can	18	0,511	0,559	0,668	0,121	0,633	0,289	0,581	0,195	0,653	0,428	0,577	0,420
BC	50	–	0,440	–	0,310	0,604	0,497	0,280	0,257	0,322	0,472	0,266	0,175
Cor	55	0,291	0,419	0,044	0,091	0,411	0,099	0,535	0,105	0,333	0,304	0,496	0,311
USG	72	0,477	0,292	0,436	0,439	0,748	0,465	0,602	0,557	0,599	0,585	0,377	0,363
Iba	26	0,038	0,377	0,084	0,016	0,361	0,107	0,345	0,112	0,304	0,489	0,680	0,222
UPD	74	0,572	0,533	0,396	0,394	0,798	0,629	0,629	0,557	0,478	0,783	0,484	0,505
Mu	31	0,217	0,711	0,434	0,263	0,715	0,212	0,738	0,579	0,681	0,779	0,301	0,445
At	81	0,673	0,673	0,567	0,589	0,715	0,511	0,522	0,459	0,549	0,777	0,474	0,591
Pi	27	–	0,588	0,101	0,165	0,613	0,013	0,587	0,300	0,131	0,891	0,708	0,192
RL	30	0,361	0,551	0,544	0,148	0,438	0,465	0,200	0,015	0,356	0,465	0,112	0,314

Est: Estações; Nºv: Número de valores; Ju: Jucati; La: Lagedo; Ca: Caetés; Ga1: Garanhuns (INMET) Ga2 (SUDENE); Ga3: Garanhuns (DNOCS); Ga4: Garanhuns (Itep); Bre1: Brejão – IPA; Bre2: Brejão- SUDENE; Can: Conhotinho; BC: Bom Conselho; Cor: Correntes; USG: Usina Serra Grande (836094); Iba: Ibateguara; UPD: União dos Palmares (DNOCS - 936053); Mu: Murici; Ata: Atalaia; Pil: Pilar; R L: Rio Largo.

Anexo 2

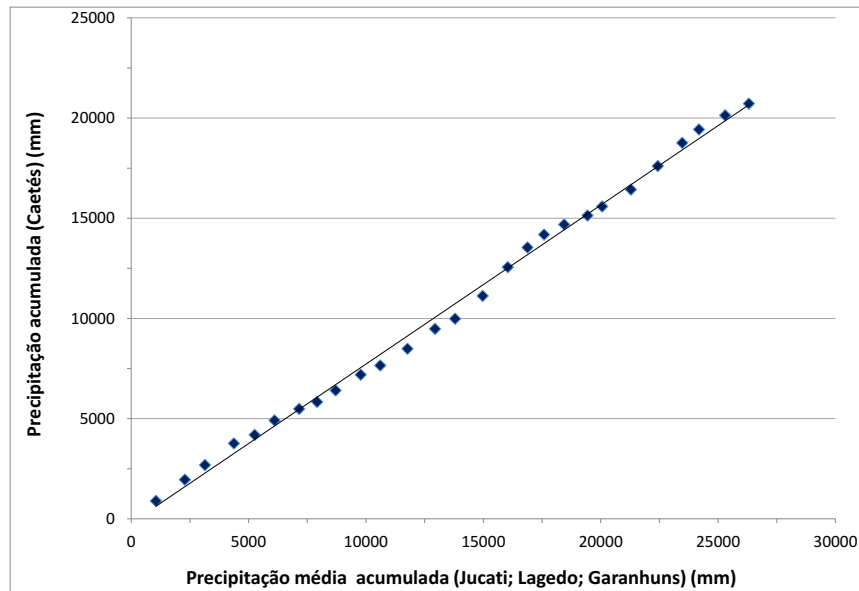


Figura 1 – Ensaio de dupla acumulação da estação Caetés.

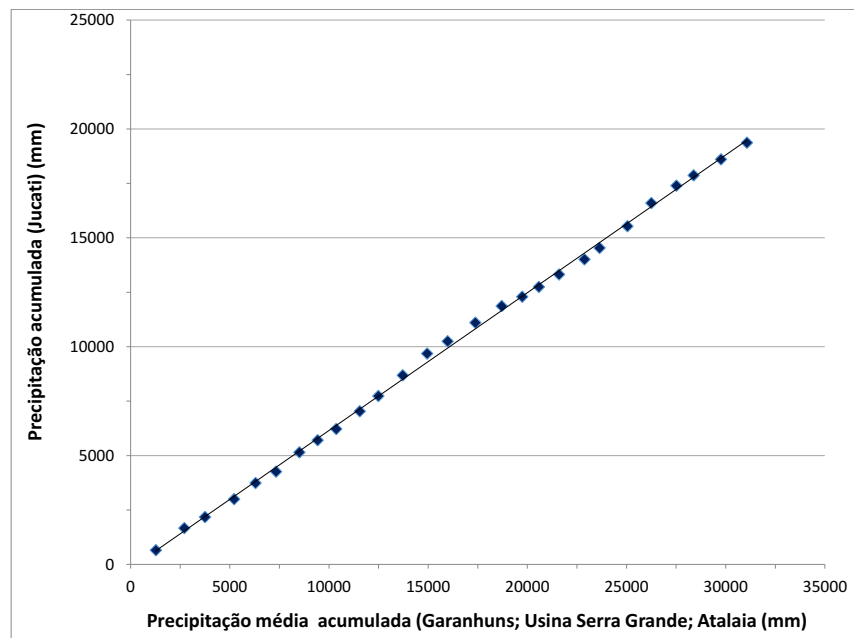


Figura 2 – Ensaio de dupla acumulação da estação Jucati.

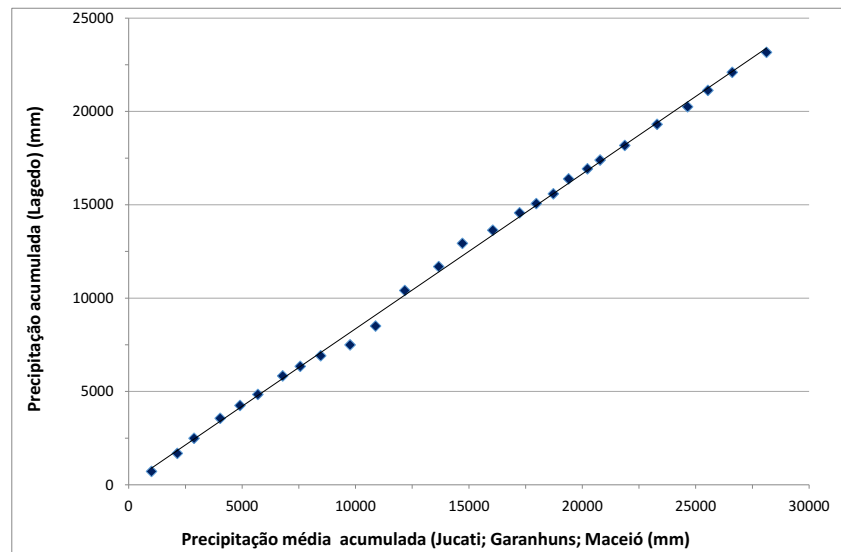


Figura 3 – Ensaio de dupla acumulação da estação Lagedo.

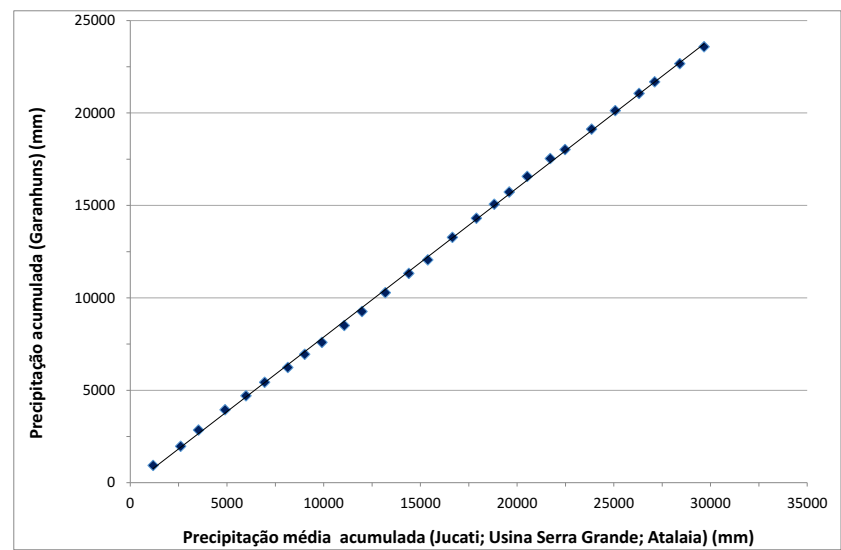


Figura 4 – Ensaio de dupla acumulação da estação Garanhuns.

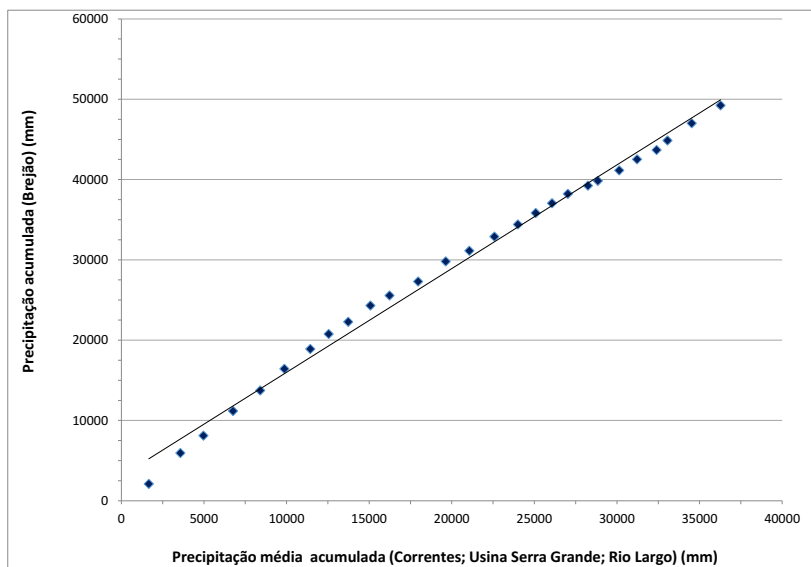


Figura 5 – Ensaio de dupla acumulação da estação Brejo.

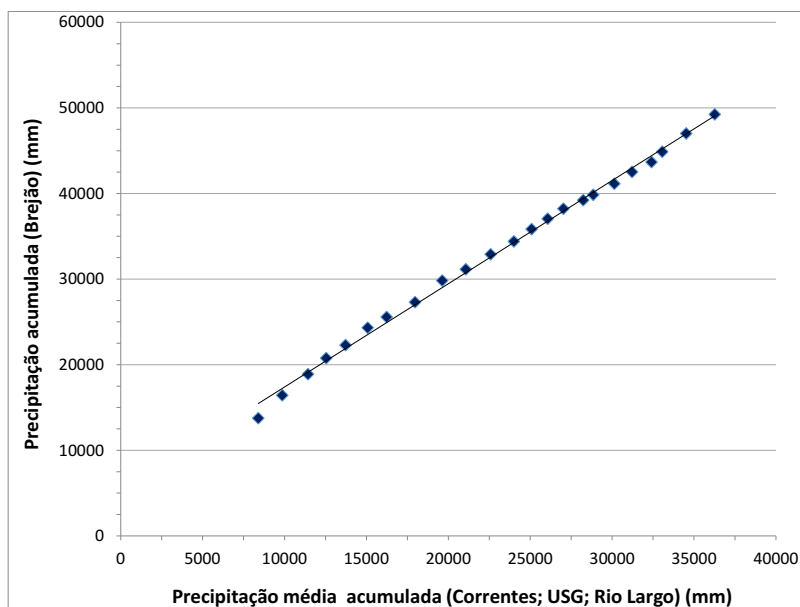


Figura 6 – Ensaio de dupla acumulação da estação Brejo (1967 – 1989).

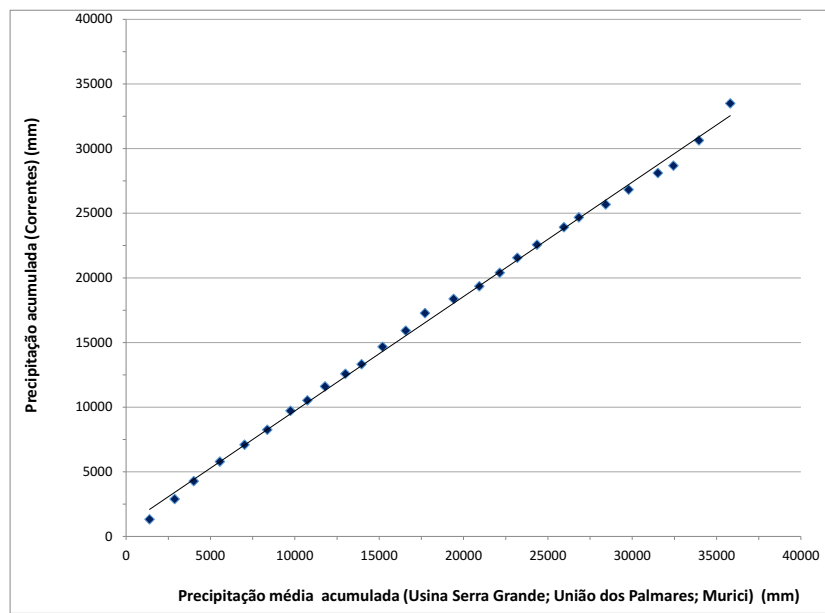


Figura 7 – Ensaio de dupla acumulação da estação Correntes.

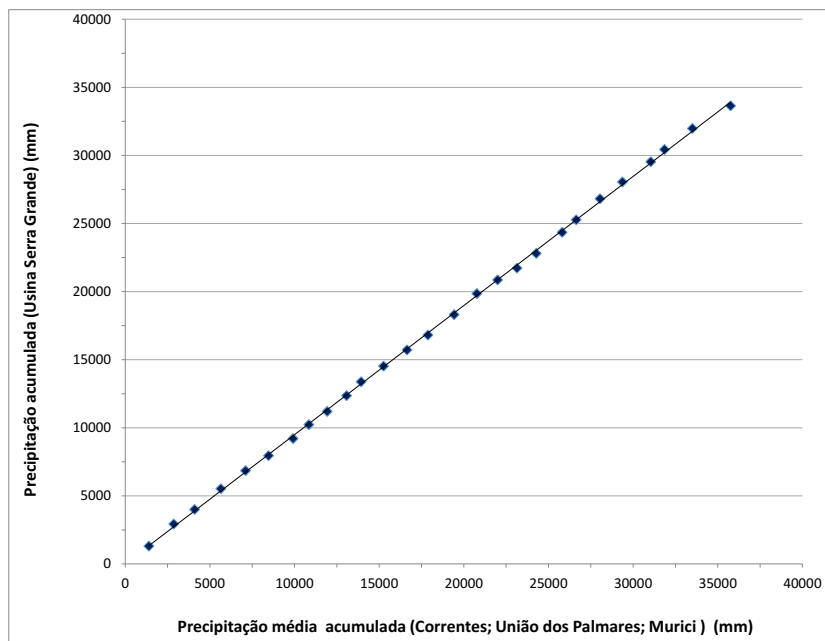


Figura 8 – Ensaio de dupla acumulação da estação Usina Serra Grande.

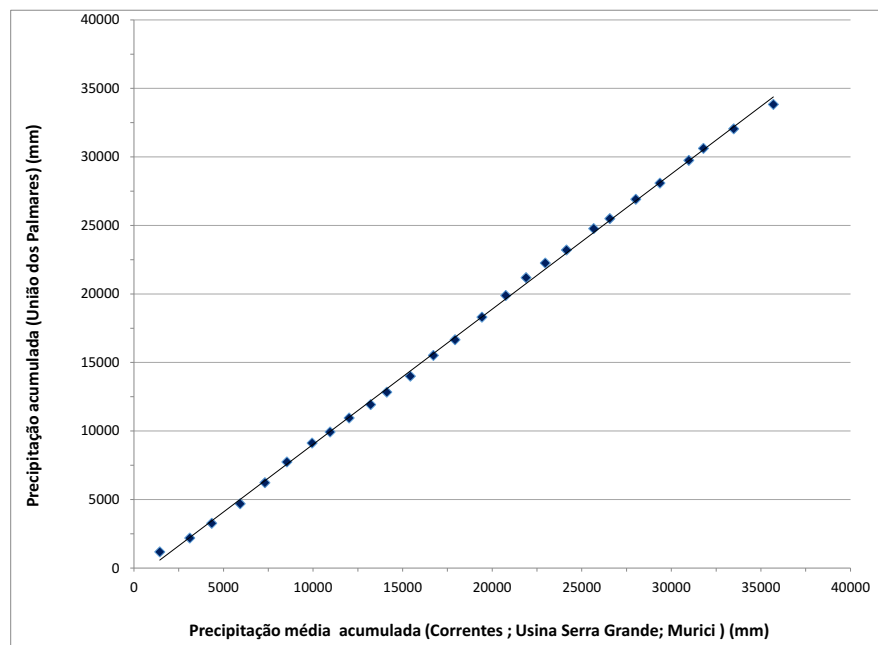


Figura 9 – Ensaio de dupla acumulação da estação União dos Palmares.

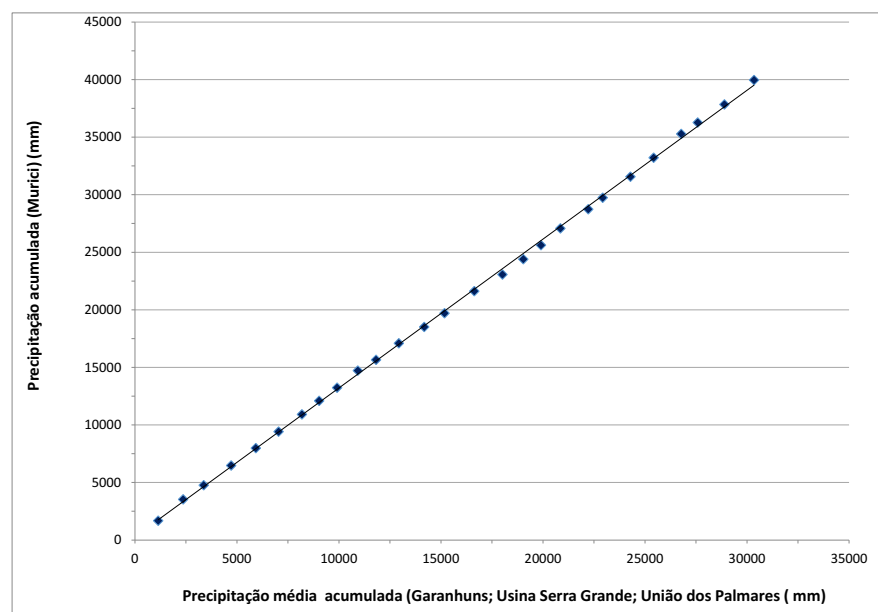


Figura 10 – Ensaio de dupla acumulação da estação Murici.

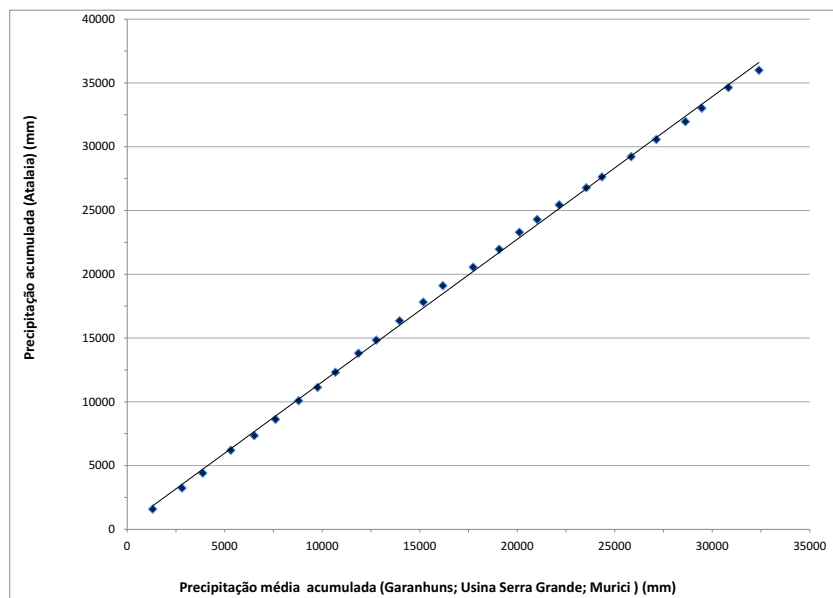


Figura 11 – Ensaio de dupla acumulação da estação Atalaia.

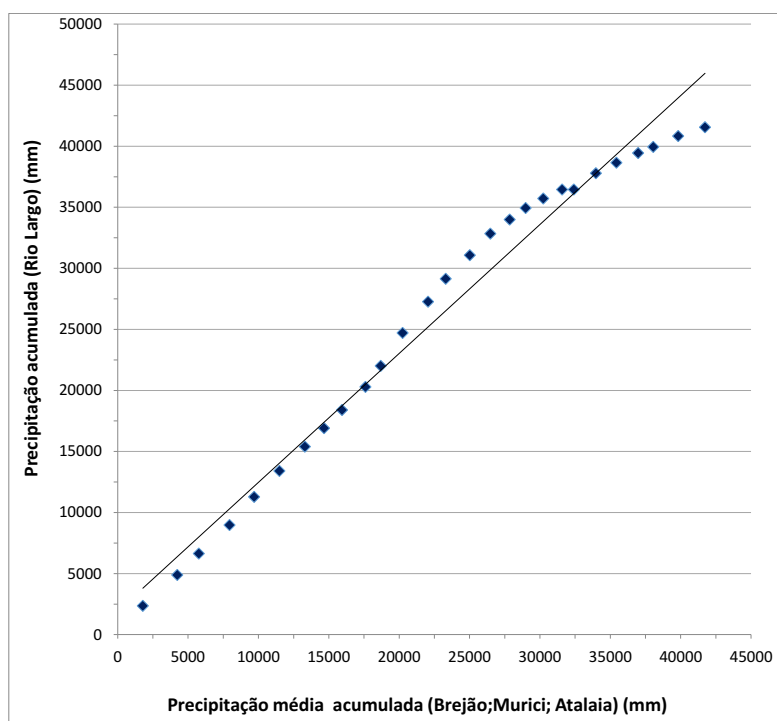


Figura 12 – Ensaio de dupla acumulação da estação Rio Largo.

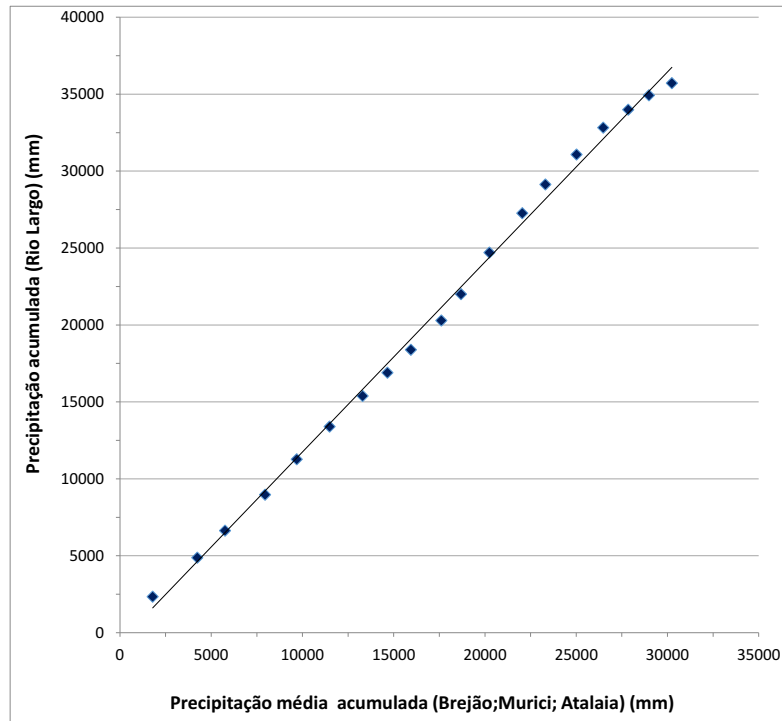


Figura 13 – Ensaio de dupla acumulação da estação Rio Largo (1963 – 1981).

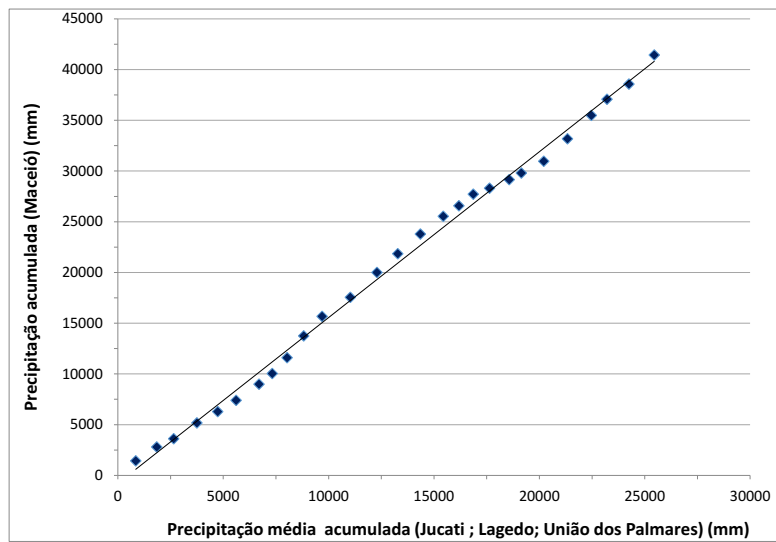


Figura 14 – Ensaio de dupla acumulação da estação Maceió.

Anexo 3

Anexo 3 – Precipitação anual (1963-1989)

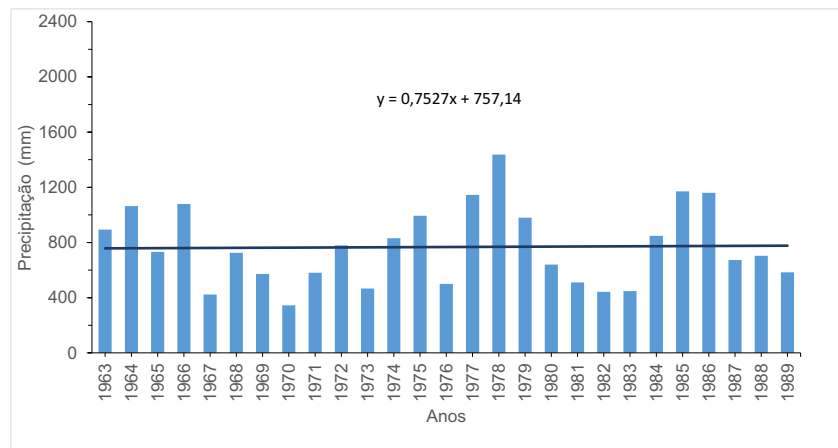


Figura 1 - Precipitação total anual e tendência na estação de Caetés.

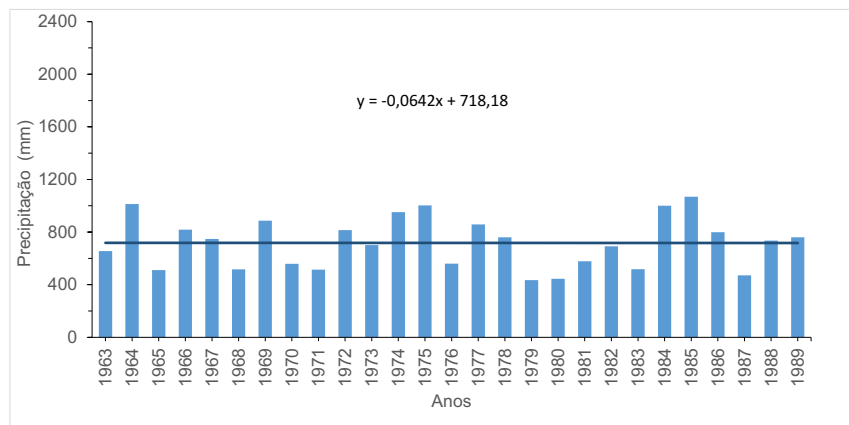


Figura 2 - Precipitação total anual e tendência na estação de Jucati.

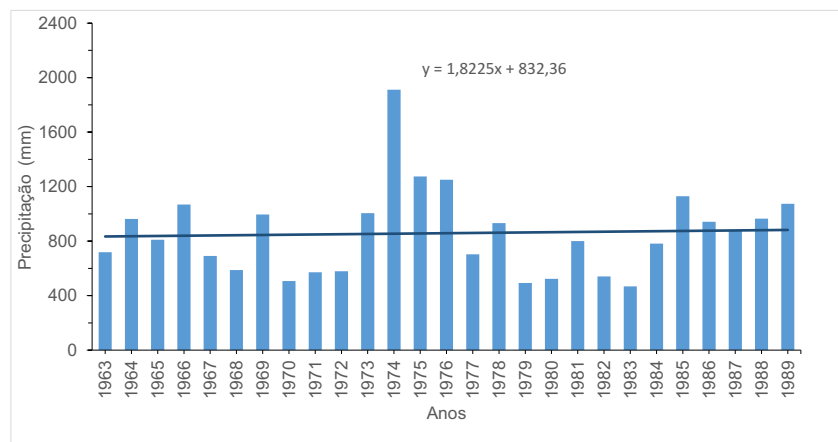


Figura 3 - Precipitação total anual e tendência na estação de Lagedo.

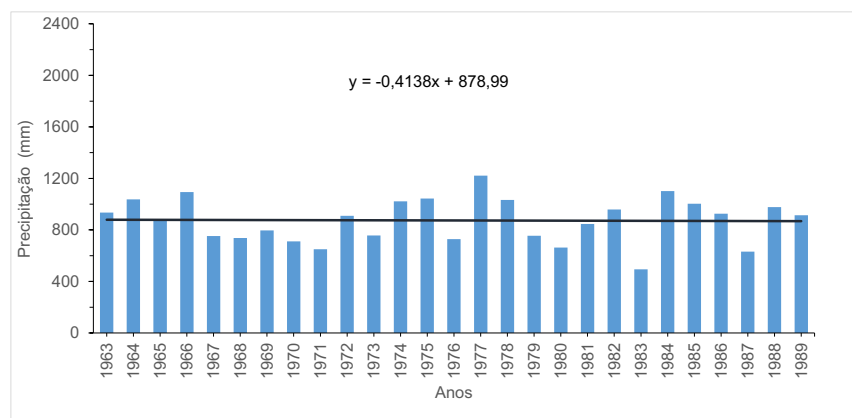


Figura 4 - Precipitação total anual e tendência na estação de Garanhuns.

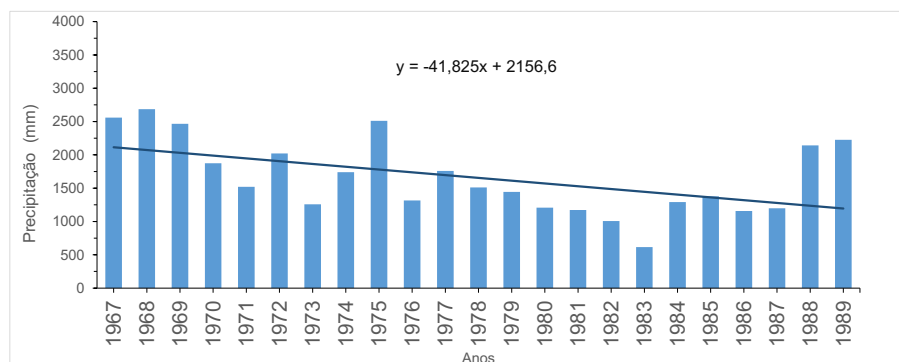


Figura 5 - Precipitação total anual e tendência na estação de Brejão.

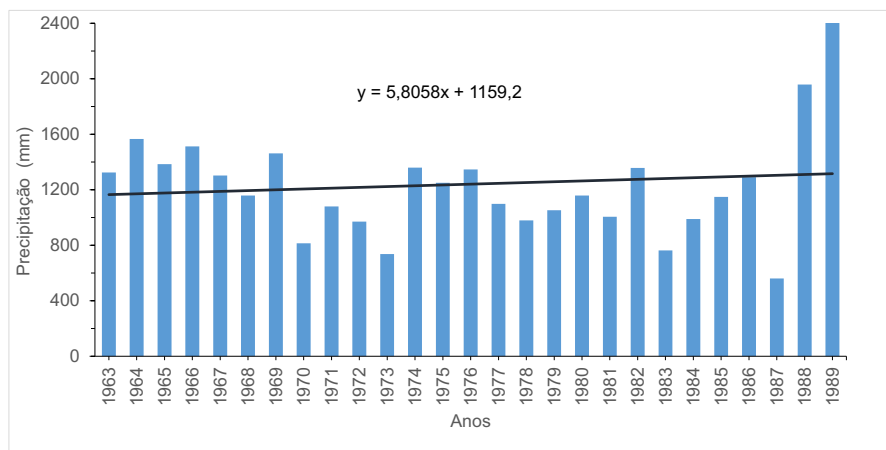


Figura 6 - Precipitação total anual e tendência na estação de Correntes.

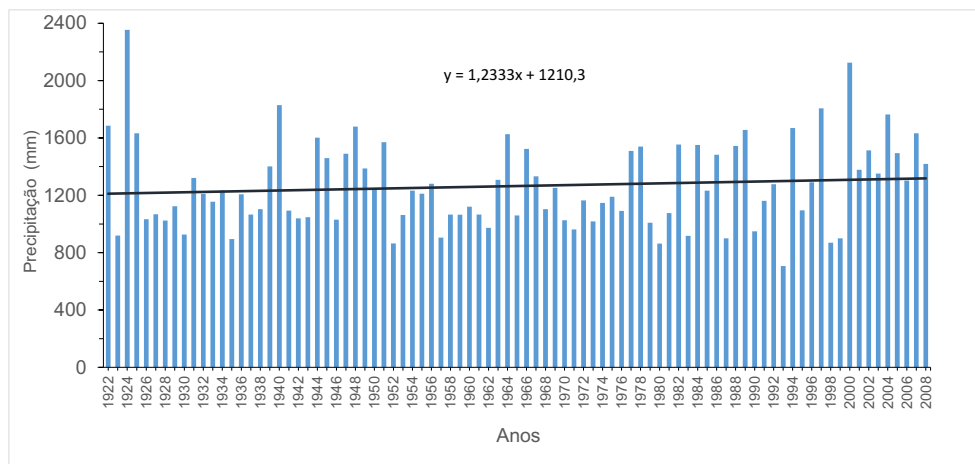


Figura 7 - Precipitação total anual e tendência na estação de Usina Serra Grande.

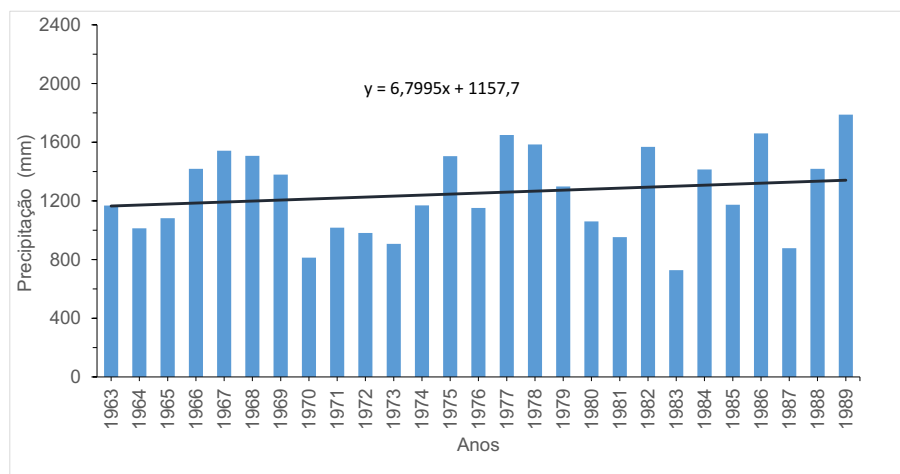


Figura 8 - Precipitação total anual e tendência na estação de União dos Palmares.

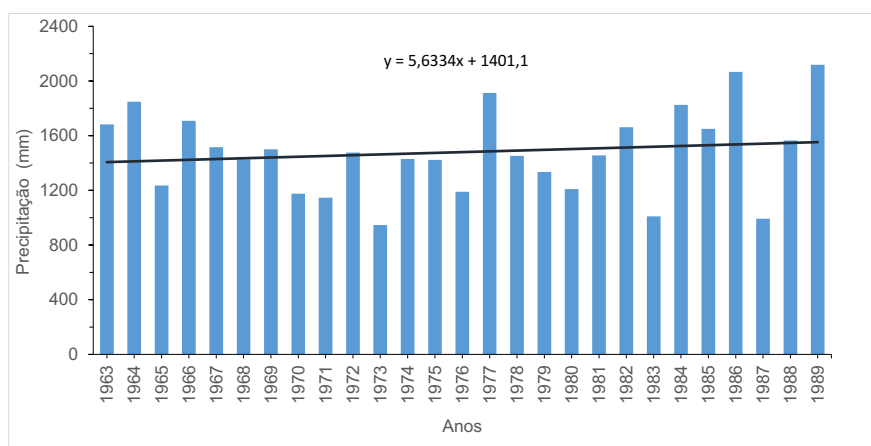


Figura 9 - Precipitação total anual e tendência na estação de Murici.

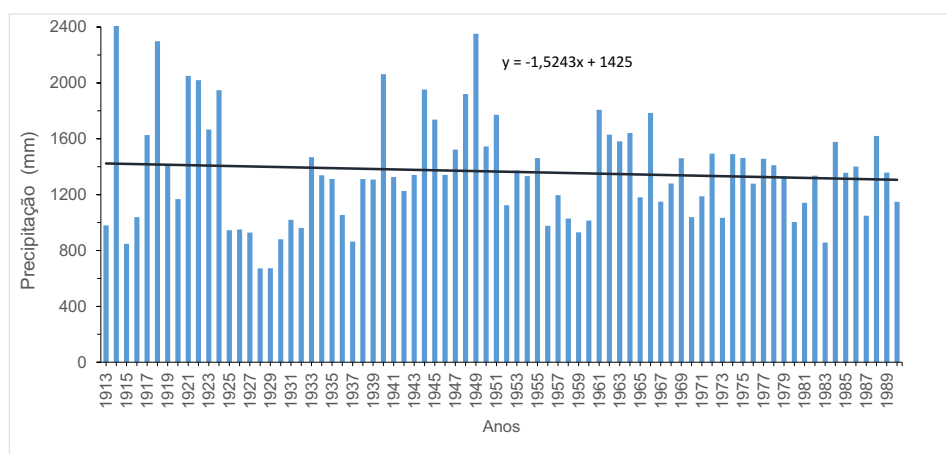


Figura 10 - Precipitação anual e tendência na estação de Atalaia.

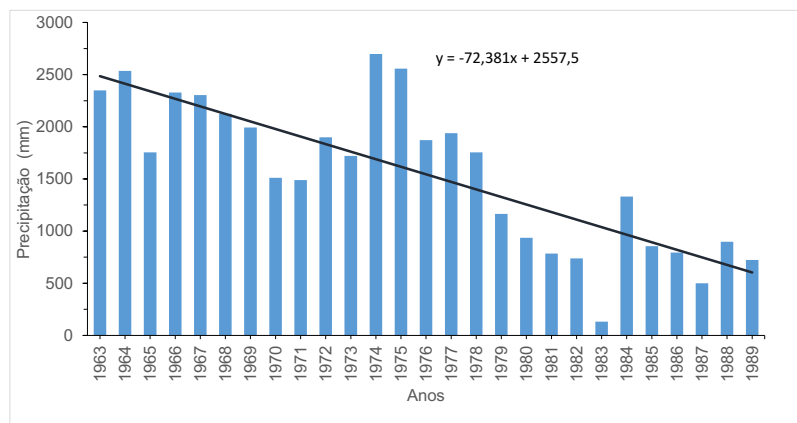


Figura 11 - Precipitação anual e tendência na estação de Rio Largo.

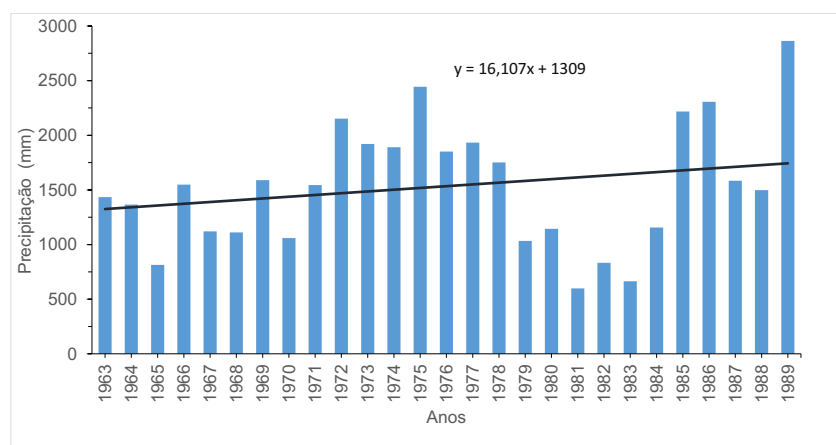


Figura 12 - Precipitação anual e tendência na estação de Maceió.

Anexo 4 – Parâmetros estatísticos da precipitação mensal (1963-1989).

Quadro 1 - Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Caetés.

Me	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	110,8	231,7	220,7	298,9	220,9	236,5	326,8	184,0	154,2	78,0	117,4	218,2
Mín	0,0	0,0	0,0	23	0,0	16,2	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Med	34,8	68,9	95,7	102,6	86,8	109,2	110,4	45,0	39,4	13,0	22,3	39,6
Mda	33,1	48,0	79,5	80,7	69,2	110,0	86,0	23,1	24,6	0,0	21,3	20,3
DP	28,6	67,9	61,7	71,9	63,6	61,2	76,8	46,5	45,1	20,9	27,1	52,1
Cv(%)	82,1	98,6	64,5	70,1	73,3	56,0	69,6	103,3	114,5	161,1	121,4	131,5

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 2 - Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Jucati.

Me	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	104,4	209,8	230,7	305,1	210,0	145,9	242,0	120,4	82,8	131,6	179,1	167,6
Mín	0,0	0,0	0,0	3,1	3,5	38,4	32,8	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Med	46,6	62,3	94,2	117,1	71,1	84,1	102,0	41,8	25,7	20,2	19,9	32,2
Mda	45,4	54,2	88,9	92,1	66,0	88,1	93,5	34,9	17,9	9,4	5,2	17,6
DP	32,7	61,2	68,4	73,9	48,3	33,5	55,0	27,6	23,0	33,1	37,5	39,9
Cv (%)	70,3	98,2	72,6	63,1	67,9	39,8	53,9	65,9	89,5	163,8	188,2	124,2

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 3- Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Lagedo.

Me*	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	219,8	170,8	444,3	239,9	444,3	325,3	199,8	96,4	108,6	196,1	105,9	126,9
Mín	0,0	3,6	12,8	16,4	0,0	36,7	32,1	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Med	60,6	50,6	144,2	127,0	96,7	113,1	111,3	44,1	34,1	26	16,8	33,3
Mda	47,2	41,7	132,0	139,2	79,0	99,6	98,8	38,6	30,9	14	6,8	17,0
DP	57,5	36,4	107,0	66,5	85,1	61,2	52,2	27,8	26,1	41	26,1	40,0
Cv (%)	94,8	71,9	74,2	52,4	87,9	54,2	46,9	63,0	76,4	157,6	155,4	120,1

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 4 - Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Garanhuns.

Me	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	120,4	149,1	300,5	257,7	300,7	213,1	268,6	138,3	98,5	211,9	113,6	166
Mín	0,4	0,6	3,2	27	19,8	58,7	35,4	15,8	3,9	0,0	0,0	0,0
Med	42,2	56,5	93,6	117,5	111,7	129,3	129,3	67,9	48,4	25,1	18,9	33,0
Mda	36,0	54,6	77,1	101,7	105,5	140,2	122	59,8	45,8	10,4	4,9	21,1
DP	33,6	45,9	65,4	60,8	72,2	43,8	58,8	32,7	30,6	46,5	29,8	40,4
Cv (%)	79,8	81,2	69,9	51,8	64,6	33,9	45,5	48,3	63,3	185,5	157,7	122,4

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 5- Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Correntes.

Me*	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	277,1	184	302,6	402,7	496,6	612,1	696,5	217,5	260,6	267,6	138,5	23,9
Mín	0,0	0,0	5	0	11	95	57,3	40,2	0	0	0	0
Med	45,3	53,6	109,4	133,1	172,4	217,2	227,3	100,1	82,9	26,7	24,5	48,2
Mda	30,2	53,8	99,1	121,4	165,8	186,8	193,6	90,2	73,2	0,0	9,3	31,5
DP	62,0	51,1	76,3	85,9	100,9	119,5	165,4	40,6	59,1	59,8	35,2	68,1
Cv (%)	137,0	95,5	69,7	64,5	58,5	55,0	72,8	40,5	71,3	223,9	144,0	141,3

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 6 - Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Usina Serra Grande.

Me*	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	93,7	214,3	262,9	314,1	358,1	328,3	481,1	260,9	170,7	165,6	136,6	145,3
Mín	1,1	6,3	20,2	32,1	30,8	70,6	88,4	43,2	12,0	1,0	0,4	1,0
Med	36,8	55,3	113,8	169,5	172,1	193,7	223,1	111,3	75,2	32,4	29,2	33,3
Mda	28,1	49,1	125,8	167,6	172,8	188,9	186,2	99,6	69,0	14,4	18,9	17,1
DP	27,0	49,2	69,1	71,9	84,1	62,9	111,9	55,0	45,5	39,0	33,4	41,1
Cv (%)	73,4	88,9	60,7	42,4	48,9	32,5	50,1	49,4	60,5	120,1	114,3	123,4

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 7 - Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de União dos
Palmares.

Me*	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	85,9	194,7	207,0	454,2	477,9	330,1	488,0	244,1	170,5	221,7	80,0	142,5
Mín	0,0	0,0	0,0	52,7	44,7	88,3	85,7	39,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Med	32,2	48,6	101,8	157,5	193,5	193,3	240,0	115,3	69,7	42,0	22,3	36,7
Mda	22,7	41,3	86,1	140,9	162,6	193,0	207,2	96,0	64,1	16,1	20,8	18,6
DP	29,0	47,1	66,3	85,6	121,3	59,1	117,0	52,3	44,3	56,8	24,7	44,7
Cv (%)	89,9	96,9	65,1	54,4	62,7	30,6	48,8	45,3	63,6	135,2	110,7	121,9

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 8 - Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Murici.

Me*	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	139,4	259,8	306,7	396,4	603,5	355,4	558,0	371	220,2	169,0	103,3	247,0
Mín	9,0	3,0	0,0	17,1	69,1	82,1	78,4	20	8,6	0,0	0,0	0,0
Med	44,1	65,5	132,5	187,0	240	215,7	255,5	130,7	89,1	46,8	26,5	46,6
Mda	32,1	55,6	142,1	164,4	238,3	207,1	206,9	118,3	81,1	28,9	17,1	18,0
DP	36,2	64,4	83,0	100,3	122,5	73,9	137,0	87,0	57	45,9	29,2	66,5
Cv (%)	82,2	98,3	62,7	53,6	51,0	34,2	53,6	66,6	63,9	98,2	110,0	142,5

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 9 - Medidas estatísticas da precipitação mensal (mm) da estação de Atalaia.

Me*	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máx	92,6	243,0	321,0	345,0	551,0	379,9	534,0	237,3	260,9	198,0	129,0	177,2
Mín	1,9	0,0	10,3	38,0	40,0	65,0	55,0	40,0	7,0	0,0	0,0	0,0
Med	41,7	67,2	135,6	168,1	194,1	198,4	212,0	119,7	87,8	42,5	26,2	39,7
Mda	33,0	47,2	130,0	184,0	168,0	194,0	158,5	119,5	77,0	24,5	18,0	19,3
DP	24,0	66,5	81,0	86,6	113,3	79,9	117,7	52,9	61,3	51,3	29,9	49,0
Cv (%)	57,5	99,0	59,7	51,5	58,4	40,3	55,5	44,2	69,8	120,8	114,2	123,5

CV – Coeficiente de variação.

Quadro 10- Medidas estatísticas da precipitação mensal da estação de Maceió.

Me*	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máx	129,2	277,8	356,2	439,7	630,8	411,7	665,6	381,2	294,6	275,0	337,2	159,4
Mín	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Med	52,9	74,0	134,5	196,6	274,2	230,3	235,7	108,5	100,8	54,7	34,7	37,6
Mda	49,4	59,8	108,0	196,8	261,6	248,0	200,3	94,4	72,0	23,6	14,7	20,6
DP	37,8	71,1	95,8	113,3	162,2	128,2	170,0	81,7	77,8	75,3	66,1	44,2
Cv (%)	71,5	96,1	71,2	57,6	59,2	55,7	72,1	75,2	77,2	137,7	190,5	117,5

CV – Coeficiente de variação.

Anexo 5

Quadro 1- Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Solo exposto	Neossolos regolítico eutrófico	D	89	Pastagens ou terrenos em más condições
Agrícola/Pasto			83	Normais em curva de nível
Cana-de-açúcar/Solo exposto			83	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta			76	Normais
Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			100	-
Água			83	Campos permanentes baixa transpiração
Terrenos húmidos	Argissolos - Amarelo	C	87	Zona residenciais 1000m2
Urbano			83	Zona residenciais 1000m2
Solo exposto			89	Pastagens ou terrenos em más condições
Agrícola/Pasto			75	Normais em curva de nível
Cana-de-açúcar/Solo exposto			87	Solo lavrado Em fileiras retas
Água			100	-
Floresta	Planossolos solódicos	D	70	Normais
Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			75	Campos permanentes baixa transpiração
Terrenos húmidos	Planossolos solódicos	D	89	Pastagens ou terrenos em mas condições
Solo exposto			83	Normais em curva de nível

Quadro 2 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	C N	Uso do solo (Tucci 1998)
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Planossolos solódicos	D	76	Normais
Cana-de-açúcar/Solo exposto	Planossolos solódicos	D	90	Solo lavrado Em fileiras retas
Terrenos húmidos			83	Campos permanentes baixa transpiração
Água			100	-
Cana-de-açúcar	Neossolos regolítico eutrófico	C	89	Solo lavrado Em fileiras retas
Agrícola/Pasto	Argisolos - Vermelho	C	67	Normais em curva de nível
Cana-de-açúcar			78	Solo lavrado Em fileiras retas
Solo exposto			86	Pastagens ou terrenos em más condições
Cana-de-açúcar/Solo exposto			87	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			70	Normais
Terrenos húmidos			75	Campos permanentes baixa transpiração
Água			100	-
Urbano	Planossolos solódicos	D	86	Zona residenciais 1000m ²

Quadro 3 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Urbano	Argissolo Vermelho - Amarelo	C	83	Zona residenciais 1000m2
Cana-de-açúcar	Argissolos - Amarelo	C	78	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Ombrófila			62	Densas, alta transpiração
Solo exposto		A	68	Pastagens ou terrenos em más condições
Agrícola/Pasto			25	Normais em curva de nível
Água	Latossolo Amarelo	A	100	-
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			36	Normais
Floresta Ombrófila	Planossolos solódicos	D	64	Densas, alta transpiração
Cana-de-açúcar			89	Solo lavrado Em fileiras retas
Terrenos húmidos	Latossolos - Amarelo	A	45	Campos permanentes baixa transpiração
Floresta Ombrófila	Neossolos regolítico eutrófico	D	64	Densas, alta transpiração
Floresta Ombrófila	Latossolos - Amarelo	A	26	Densas, alta transpiração
Urbano			61	Zona residenciais 1000m2
Cana-de-açúcar			57	Solo lavrado Em fileiras retas

Quadro 4 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Urbano			83	Zona residenciais 1000m2
Floresta Ombrófila	Argissolo Vermelho - Amarelo	C	62	Densas, alta transpiração
Agrícola/Pasto			78	Terraceamento
Cana-de-açúcar			78	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			70	Normais
Solo exposto			86	Pastagens ou terrenos em más condições
Terrenos húmidos			75	Campos permanentes baixa transpiração
Floresta Ombrófila			62	Densas, alta transpiração
Cana-de-açúcar/Solo exposto	Latosolos Vermelho - Amarelo	C	87	Solo lavrado Em fileiras retas
Cana-de-açúcar			78	Solo lavrado Em fileiras retas
Agrícola/Pasto			75	Normais em curva de nível
Cana-de-açúcar/Solo exposto			87	Solo lavrado Em fileiras retas
Água	Neossolos Flúvico	D	100	-
Agrícola/Pasto			83	Normais em curva de nível
Terrenos húmidos	Latosolos Vermelho - Amarelo	C	75	Campos permanentes baixa transpiração
Floresta Ombrófila			62	Densas, alta transpiração

Quadro 5 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Cana-de-açúcar	Neossolos Flúvico	D	89	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Ombrófila			64	Densas, alta transpiração
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Latossolos Vermelho - Amarelo	C	70	Normais
Terrenos húmidos	Neossolos Flúvico	D	83	Campos permanentes baixa transpiração
Solo exposto	Latossolos Vermelho - Amarelo	C	86	Pastagens ou terrenos em más condições
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Neossolos Flúvico	D	76	Normais
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Latossolos Vermelho - Amarelo	C	70	Normais
Cana-de-açúcar/Solo exposto	Neossolos Flúvico	D	90	Solo lavrado Em fileiras retas

Quadro 6 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Terrenos húmidos	Neossolos Flúvico	D	83	Campos permanentes baixa transpiração
Solo exposto	Latosolos Vermelho - Amarelo	C	86	Pastagens ou terrenos em más condições
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Neossolos Flúvico	D	76	Normais
Cana-de-açúcar	Neossolos Flúvico	D	89	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Ombrófila			64	Densas, alta transpiração
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Latosolos Vermelho - Amarelo	C	70	Normais
Terrenos húmidos	Neossolos Flúvico	D	83	Campos permanentes baixa transpiração
Solo exposto	Latosolos Vermelho - Amarelo	C	86	Pastagens ou terrenos em más condições
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Neossolos Flúvico	D	76	Normais

Quadro 7- Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Água	Argissolo Vermelho - Amarelo	C	100	-
Cana-de-açúcar/Solo exposto	Neossolos Flúvico	D	90	Solo lavrado Em fileiras retas
Água	Latosolos Vermelho - Amarelo	C	100	-
Cana-de-açúcar	Neossolos Litólico	D	89	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			76	Normais
Agrícola/Pasto			83	Normais em curva de nível
Floresta Ombrófila			64	Densas, alta transpiração
Terrenos húmidos			83	Campos permanentes baixa transpiração
Cana-de-açúcar/Solo exposto			90	Solo lavrado Em fileiras retas
Solo exposto			89	Pastagens ou terrenos em más condições
Urbano			87	Zona residenciais 1000m2

Quadro 8 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Água	Argissolo Vermelho - Amarelo	C	100	-
Cana-de-açúcar/Solo exposto	Neossolos Flúvico	D	90	Solo lavrado Em fileiras retas
Água	Latossolos Vermelho - Amarelo	C	100	-
Cana-de-açúcar	Neossolos Litólico	D	89	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			76	Normais
Agrícola/Pasto			83	Normais em curva de nível
Floresta Ombrófila			64	Densas, alta transpiração
Terrenos húmidos			83	Campos permanentes baixa transpiração
Cana-de-açúcar/Solo exposto			90	Solo lavrado Em fileiras retas
Solo exposto			89	Pastagens ou terrenos em más condições
Urbano			87	Zona residenciais 1000m2
Urbano	Argissolo Vermelho - Amarelo	C	83	Zona residenciais 1000m2

Quadro 9 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Floresta Ombrófila	Planossolos Háplico	D	64	Densas, alta transpiração
Cana-de-açúcar			89	Solo lavrado Em fileiras retas
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			76	Normais
Agrícola/Pasto			83	Normais em curva de nível
Terrenos húmidos			83	Campos permanentes baixa transpiração
Água			100	-
Cana-de-açúcar/Solo exposto			90	Solo lavrado Em fileiras retas
Solo exposto			89	Pastagens ou terrenos em más condições
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Gleissolos	D	76	Normais
Agrícola/Pasto			89	Terraceamento
Cana-de-açúcar			89	Solo lavrado Em fileiras retas
Cana-de-açúcar/Solo exposto			90	Solo lavrado Em fileiras retas
Solo exposto			89	Pastagens ou terrenos em más condições
Terrenos húmidos	Neossolos Litólico Eutróficos	D	83	Campos permanentes baixa transpiração
Agrícola/Pasto			83	Normais em curva de nível
Solo exposto			89	Pastagens ou terrenos em más condições
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas			76	Normais

Quadro 10 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Terrenos húmidos	Neossolos Litólicos Eutróficos	D	83	Campos permanentes baixa transpiração
Água	Gleissolos	D	100	-
Floresta Ombrófila			64	Densas, alta transpiração
Água	Neossolos Litólicos Eutróficos	D	100	-
Floresta Ombrófila			64	Densas, alta transpiração
Solo exposto	Neossolos Flúvicos	D	89	Pastagens ou terrenos em más condições
Urbano			87	Zona residenciais 1000m2
Água			100	-
Urbano	Gleissolos	D	87	Zona residenciais 1000m2
Cana-de-açúcar	Neossolos Quartzarênicos	B	70	Solo lavrado Em fileiras retas
Cana-de-açúcar	Gleissolos	D	89	Solo lavrado Em fileiras retas

Quadro 11 - Uso do solo, tipos de solos e valores de CN.

Uso e ocupação do solo	Solos	Grupo hidrológico	CN	Uso do solo (Tucci 1998)
Terrenos húmidos	Solos de Mangue	D	83	Campos permanentes baixa transpiração
Floresta Sub/Caducifólia/Hipoxerófilas	Neossolos Quartzarênicos	B	60	Normais
Floresta Ombrófila			52	Densas, alta transpiração
Cana-de-açúcar/Solo exposto	Neossolos Quartzarênicos	B	80	Solo lavrado Em fileiras retas
Terrenos húmidos			66	Campos permanentes baixa transpiração
Agrícola/Pasto			59	Normais em curva de nível
Água			100	-
Água			100	-
Urbano	Neossolos Quartzarênicos	B	72	Zona residenciais 1000m2